This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

**Usage guidelines**

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

**About Google Book Search**

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

**A propos de ce livre**

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

**Consignes d'utilisation**

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

**À propos du service Google Recherche de Livres**

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

GODFREY LOWELL CABOT SCIENCE LIBRARY
*of the Harvard College Library*

This book is
FRAGILE
and circulates only with permission.
Please handle with care
and consult a staff member
before photocopying.

Thanks for your help in preserving
Harvard's library collections.

# TRAITÉ DESCRIPTIF

ET RAISONNÉ

DES

# CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES.

*Les formalités voulues par la loi pour assurer la propriété de cet ouvrage ont été remplies.*
*Droits de traduction et de reproduction réservés.*

Bruxelles. — Typ. Bruylant-Christophe et Cie, rue Blaes, 31.

# TRAITÉ DESCRIPTIF

ET RAISONNÉ

DES

# CONSTRUCTIONS

## HYDRAULIQUES

A LA MER ET DANS LES EAUX COURANTES

AVEC APPLICATIONS AUX TRAVAUX MILITAIRES,

PAR

**E. ROFFIAEN,**

CAPITAINE DU GÉNIE, ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE MILITAIRE DE BELGIQUE.

---

DEUXIÈME PARTIE.

## CONSTRUCTIONS MARITIMES.

BRUXELLES.

BRUYLANT-CHRISTOPHE & COMPAGNIE, IMPRIMEURS-ÉDITEURS,

RUE BLAES, 31.

A. DECQ, RUE DE LA MADELEINE, 9.

PARIS.

CH. TANERA, ÉDITEUR,

RUE DE SAVOIE, 6.

LA HAYE.

HÉRITIERS DOORMAN,

LIBRAIRES.

1863

Eng 928.61

HARVARD COLLEGE
FEB 5 1921
LIBRARY

Degrand fund

# CONSTRUCTIONS MARITIMES.

## CHAPITRE PREMIER.

### PRÉLIMINAIRES.

---

### DESCRIPTIONS GÉNÉRALES.

#### Syzygies et quadratures.

*Syzygies et quadratures.* — La lune décrit une ellipse dont le centre de la terre occupe l'un des foyers F (fig. 1).

L'on appelle *syzygies* les deux phases d'une lunaison où la lune a même longitude que le soleil S; elle se trouve alors en *conjonction*, A, ou en opposition, A′ ; dans la première position elle est nouvelle, dans la seconde elle est pleine.

Les positions B et B′ de la lune s'appellent *quadratures ;* elle est située alors à 90° du soleil, et son disque est à moitié éclairé.

*Marées.* — On désigne sous ce nom l'exhaussement (flux ou flot) et l'abaissement (reflux ou jusant) périodiques des eaux de la mer dus aux attractions combinées de la lune et du soleil.

On peut se former une idée exacte de ce phénomène en supposant le soleil placé dans le plan de l'équateur, et en recherchant l'action qu'il doit exercer à la fois sur les eaux de la mer et sur le reste du globe. En vertu de la loi d'attraction, cet astre doit attirer davantage les molécules liquides situées de son côté que le centre de la terre dont il est plus éloigné ; par suite de leur mobilité, ces molécules se

soulèveront ainsi sous l'influence de l'attraction solaire, et tendront à s'éloigner du centre de la sphère terrestre. D'un autre côté, le soleil agira avec plus d'intensité sur ce centre que sur les molécules liquides situées dans la partie du globe diamétralement opposée à l'astre, et par conséquent, ces molécules tendront aussi à se détacher de la surface, à s'éloigner du centre comme les premières. L'effet produit par le soleil doit donc être un renflement de la mer en deux endroits de la terre opposés, et situés sur la droite qui joint les deux astres. En suivant ce raisonnement, l'on arriverait à conclure que les deux points de plus grand abaissement doivent se trouver à 90° des précédents, qui correspondent aux plus fortes élévations.

Cette théorie des marées est pleinement confirmée par l'expérience, et s'applique de la même manière à l'action de la lune. Mais l'influence de celle-ci est trois fois plus puissante que celle du soleil. Cet excès n'a rien qui doive surprendre, lorsqu'on considère que le phénomène des marées n'a lieu qu'en vertu de l'inégalité des distances relatives des divers points du globe aux astres qui les attirent. On conçoit en effet qu'une différence d'environ 1500 lieues, c'est-à-dire d'un rayon de la terre, puisse avoir de l'influence sur la valeur de l'attraction exercée par la lune sur le centre de la terre et sur un point de sa surface, attendu que la distance entre ces deux planètes n'est que de 60 rayons de la dernière. Quoique la masse du soleil soit infiniment plus grande que celle de la lune, l'inégalité d'action de cet astre est moins sensible à cause de son énorme distance de notre globe, qui est d'environ 24,096 rayons terrestres.

Les marées réelles sont donc les résultantes des marées solaires et lunaires. Les plus fortes ont lieu vers les syzygies; on voit en effet (fig. 1) qu'en ces positions, les deux astres agissent simultanément pour soulever les eaux ; alors aussi ont lieu les marées les plus basses. Dans les quadratures, les actions sollicitantes produisent des effets qui s'entre-détruisent en partie, et l'action prédominante de la lune ne produit plus qu'une marée très-faible.

Il y a chaque jour deux marées, entre deux retours successifs de la lune au méridien du lieu.

L'espace de temps qui s'écoule entre deux hautes mers successives n'est pas constant ; il offre de petites inégalités semblables à celles de

la lune. Sa valeur moyenne est de 12 heures 42 minutes sur nos côtes, et de 12 heures 24 minutes sur celles de France. Ainsi, le temps qui s'écoule pendant deux marées consécutives dépasse le jour sidéral d'environ une heure; c'est-à-dire que les marées d'un jour arrivent toujours plus tard que celles du jour précédent. Cela provient du retard du passage de la lune au méridien du lieu, retard qui se produit parce qu'elle avance, dans son orbite, de l'Ouest à l'Est, pendant une révolution diurne de la terre dans le même sens.

On peut donc se représenter l'intumescence de la marée dans l'Océan comme suivant le mouvement de la lune, et arrivant quelque temps après elle au méridien.

L'accroissement des marées, en allant vers les syzygies, et leur diminution vers les quadratures, sont graduels. Cependant, la régularité n'a pas lieu pour les deux marées d'un même jour, et l'on appelle *marée totale* la demi-somme des hauteurs de deux pleines mers consécutives au-dessus de la basse mer intermédiaire.

On désigne sous le nom de *plein* le temps pendant lequel la mer est *étale,* c'est-à-dire, où elle cesse de monter ou de descendre. Ce temps varie avec les lieux ; il est de 20 minutes à Boulogne, de trois quarts d'heure à Dunkerque, etc.

Une marée fait *deux eaux,* ou est dite *à deux étales,* lorsque, soit pendant le flux soit pendant le reflux, elle s'arrête pendant un temps plus ou moins long avant de continuer son mouvement d'ascension ou de descente jusqu'à la limite.

Ainsi, entre Rochefort et l'embouchure de la Charente, la marée fait deux eaux pendant les quadratures. Voici en quoi consiste ce phénomène.

Pendant trois jours environ, à l'époque des quadratures, le flux ou flot, qui y dure environ cinq heures, est partagé en deux ascensions; il monte durant trois heures, puis la mer reste étale 7 à 8 minutes; c'est la première eau. La marée descend alors pendant une heure ou davantage, pour remonter ensuite jusqu'à l'heure déterminée du jour; la mer reste encore étale pendant quatre à huit minutes; c'est la deuxième eau.

Cette anomalie n'existe pas en pleine mer.

*Établissement du port.* — C'est l'heure, pour ce port, de la pleine

mer aux syzygies, c'est-à-dire les jours de nouvelle et de pleine lune. On peut aussi le définir ainsi : le retard que la marée haute éprouve, dans ce port, sur le passage de la lune au méridien, pendant les syzygies.

Ce retard est constant pour un même port; il atteint sur nos côtes les valeurs suivantes :

| | |
|---|---|
| Nieuport. . . . . | 15 minutes. |
| Ostende . . . . . | 20 minutes. |
| Flessingue . . . . . | 1 heure. |
| Anvers . . . . . | 1 heure 25 minutes. |

Pour les villes de Calais et de Dunkerque, il est de 11 heures 45 minutes; c'est-à-dire que, les jours de syzygies, la mer est haute à $11^h45'$ à Calais et à Dunkerque, tandis qu'elle n'arrive à son apogée qu'à midi 15′ pour Nieuport; à midi 20′ pour Ostende, etc.; ou bien encore, cela exprime que, les jours de nouvelle et de pleine lune, la haute mer arrive $11^h45'$ après le passage de la lune au méridien des deux premières villes.

Il faut bien remarquer que cette marée qui a lieu les jours de syzygies est due à l'action combinée du soleil et de la lune du jour précédent, ou plutôt, d'un moment antérieur de 36 heures environ. Ainsi, sur les côtes de France et de Belgique, la plus haute marée n'a lieu que 36 heures après l'instant des syzygies.

*Heures des marées.* — A part les jours de syzygies, l'heure des marées est variable. Elle dépend de causes déterminées et de circonstances imprévues : ces dernières sont surtout produites par les vents. Les premières étant dues à l'action combinée du soleil et de la lune, l'heure des marées varie naturellement suivant la position de ces astres. La pente et la configuration des côtes ont aussi une certaine influence.

L'*Annuaire du bureau des longitudes* donne le moyen de calculer l'heure de la pleine mer pour tous les jours de l'année. Un moyen simple mais peu exact de l'obtenir, consiste à ajouter à l'heure de l'établissement du port autant de fois 48 minutes qu'il s'est écoulé de jours depuis celui de la nouvelle ou de la pleine lune.

*Unité de marée.* — C'est la moitié de la marée totale moyenne d'un grand nombre de marées observées environ 36 heures après la syzygie des équinoxes.

*Coefficient de marée.* — L'on appelle ainsi le nombre par lequel il faut multiplier l'unité de marée d'un port pour avoir la hauteur de la marée haute. Ce nombre variable est indiqué, pour chaque jour, dans l'une des tables de l'*Annuaire du bureau des longitudes.*

*Durée et hauteur des marées.* — Les mouvements périodiques et réguliers de la mer ne s'opèrent pas suivant une progression constante. Les astronomes admettent que, si *ag* (fig. 2), diamètre du cercle *adgd'a,* représente la différence de la haute à la basse mer, et si, après la première heure, le niveau des eaux s'est élevé jusqu'en *bb'*, il s'élèvera jusqu'en *cc'* dans l'heure suivante, et l'arc $b'c' = bc = ab = ab'$. De sorte que la mer continuera à s'élever en décrivant des arcs égaux en temps égaux.

Cette loi n'est pas tout à fait exacte, à cause de l'influence du fond, des vents, des courants et des côtes. L'observation fait connaître les modifications à y apporter. C'est ainsi que la marée à *deux étales* et le *temps du plein* en offrent deux exceptions remarquables.

La hauteur des marées dépend en grande partie de la disposition des mers où on l'observe, parce que l'action des astres sur un espace liquide est d'autant plus énergique que les particules fluides sont plus nombreuses et répandues sur une plus grande étendue. De là vient que le flux et le reflux, qui sont très-notables dans l'Océan, ne sont presque pas sensibles dans les mers intérieures.

Les vents élèvent ou abaissent les marées selon qu'ils viennent de mer ou de terre. Leur influence peut être considérable ; c'est ainsi que, par certains vents, les pleines mers des quadratures peuvent dépasser celles des syzygies.

*Chenal.* — C'est un canal plus ou moins sinueux qui sépare la rade ou la mer soit de l'avant-port soit du port, et qui est destiné à empêcher que les ondulations des vagues ne produisent des ballottements nuisibles aux navires mouillés en arrière. Ce canal est compris d'ordinaire entre deux môles ou jetées.

L'on donne aussi le nom de chenal au pertuis d'accession à une écluse ou à un aqueduc.

*Rade.* — L'on appelle ainsi une étendue de mer, plus ou moins grande, abritée contre les mauvais vents régnants, soit par des côtes élevées, soit par des constructions supplémentaires, et qui présente aux navires un mouillage protecteur pour éviter la tempête ou pour y attendre des vents ou des marées favorables.

Pour des escadres il n'y a pas de bon port sans rade; celle-ci, en effet, est indispensable pour appareiller en masse avec rapidité ou pour opérer une retraite facile.

Les rades sont généralement dues à la nature; elles nécessitent de trop vastes dimensions pour qu'on songe à les créer. Mais on peut les développer et les améliorer par les dragages et les digues.

*Avant-port.* — L'avant-port est l'espace compris entre le chenal ou les jetées et le port ou le bassin à flot. Il reçoit les navires qui peuvent supporter l'échouage et ceux qui ont un tirant d'eau assez faible pour entrer et sortir à mi-marée.

Son but est encore d'user la vitesse des bâtiments qui arrivent sous voile, en leur permettant d'y virer dans le vent ; ce qui exige pour l'avant-port une certaine largeur. Il est bon aussi que sa longueur atteigne au moins 500 mètres et ne soit pas dans la direction des vents régnants.

Les avant-ports n'étant souvent que des ports d'échouage, leur fond est ordinairement un atterrissement vaseux ; aussi l'établissement des fondations présente-t-il alors de grandes difficultés, spécialement pour les murs de quais. Dans les ports militaires où il n'y a pas de bassin à flot, et où la profondeur est parfois insuffisante au pied des quais pour permettre l'accostage des vaisseaux de haut bord, ceux-ci se tiennent plus au large, et les communications s'établissent au moyen d'embarcadères mobiles qui suivent les mouvements de la marée.

*Port.* — On désigne sous ce nom une certaine partie de mer où les navires trouvent un abri contre l'action des vagues et du vent, et où il y a toujours assez d'eau pour qu'ils puissent accoster les quais ou docks destinés aux chargements et aux déchargements.

Cette dernière condition est facile à remplir dans la Méditerranée, la mer Noire, etc., où le niveau de l'eau demeure presque constant: les navires y sont toujours à flot, et les fondations des ouvrages sont à une grande profondeur.

Dans l'Océan, où les bâtiments ne seraient à flot qu'à marée haute, l'on est obligé de construire des ouvrages supplémentaires pour maintenir une hauteur d'eau suffisante, ou de creuser le fond à une profondeur presque toujours trop grande pour être praticable.

*Bassin à flot.* — Un bassin à flot est une tranchée plus ou moins grande où les navires sont toujours à flot; à cet effet, l'emplacement du bassin reçoit un surcroît de profondeur, et le complément de la hauteur d'eau nécessaire s'obtient au moyen d'une écluse de retenue. Celle-ci contient des portes, busquées vers l'intérieur et appelées portes *d'ebbe,* qui ont pour but de résister à la pression de l'eau du bassin et de la retenir à marée basse. Le plus souvent, elle est munie aussi d'une paire de portes dites *de flot,* busquées vers le large, en sens inverse des précédentes, et destinées à arrêter les hautes mers. Ces dernières portes ne se tiennent fermées que pour réparer le bassin ou l'écluse, ou bien pour empêcher les marées extraordinaires d'y arriver.

La profondeur d'un bassin à flot doit être de $0^{m}50$ à $1^{m}00$ plus grande que le tirant d'eau des plus forts bâtiments qu'il peut être appelé à recevoir :

1° Pour compenser les pertes qui ont lieu pendant que la mer est plus basse que le niveau du bassin, et celles qui se produisent par évaporation. Les premières dépendent surtout du degré de précision avec laquelle ferment les portes, et augmentent avec l'âge de celles-ci. Les autres varient avec la température, et sont en raison inverse de la surface exposée;

2° Afin de pouvoir disposer d'une certaine quantité d'eau pour faire des chasses à travers l'écluse pendant la marée basse;

3° Pour que les navires ne talonnent pas dans les mouvements de tangage produits par les grands vents, ou par l'agitation des vagues au moment où l'on ouvre les portes;

4° Afin de pouvoir ouvrir celles-ci un peu avant le plein, de façon à avoir plus longtemps l'écluse ouverte pour l'entrée et la sortie;

5° Par suite de l'exhaussement variable du fond, dû à la vase qu'amènent et déposent les eaux du large.

## APPLICATIONS MILITAIRES.

### Port et bassins de Cherbourg.

Le 15 avril 1803, Napoléon Ier décréta qu'un port serait creusé à Cherbourg, pour les grands vaisseaux de guerre, à cinquante pieds de profondeur au-dessous des marées hautes (fig. 39).

Ce bassin, désigné aujourd'hui sous le nom d'*avant-port*, fut terminé en 1813. Il a environ 300 mètres de longueur sur 240 de largeur ; sa profondeur est de 9m50 au-dessous des marées basses, et de 18m70 en contre-bas des terre-pleins de l'arsenal. Il a été creusé dans un rocher de granit schisteux entremêlé de quartz, et les matériaux qui en ont été extraits s'elèvent à 1,071,422 mètres cubes.

Ce port peut contenir sept vaisseaux de premier rang.

Ce travail terminé, l'on s'occupa immédiatement du bassin de flot, qui fut achevé en 1829. Sa surface forme un rectangle de 291 mètres de longueur sur 217 mètres de largeur. Creusé à la même profondeur que l'avant-port, il communique avec lui par une écluse large de 17m80. Les débris qui en ont été extraits se montent à 880,300 mètres cubes.

Ce bassin peut abriter dix-sept vaisseaux.

L'arrière-bassin, décrété comme les précédents par Napoléon Ier, ne fut commencé qu'en 1836. Il a 420 mètres de longueur sur 200 mètres de largeur, le tout mesuré à la partie supérieure. Sa profondeur est de 18 mètres en contre-bas des terre-pleins de l'arsenal, ou 8m80 au dessous des marées basses. Il communique avec l'avant-port par une écluse de 100 mètres de longueur, et avec le bassin de flot par une écluse de la même étendue, de sorte qu'un vaisseau peut arriver de la mer, traverser sans s'arrêter les deux premiers bassins, et aller prendre son mouillage dans le troisième.

L'arrière-bassin de flot a été inauguré le 8 août 1858. Il contient environ 1,600,000 mètres cubes d'eau, et peut contenir quatorze vaisseaux.

Une partie des déblais schisteux des deux derniers bassins ont servi à former les enrochements sous-marins de la grande digue et du fort Chavagnac, construit sur le bas-fond de ce nom. Ces débris

étaient versés directement dans la mer; au fort Chavagnac ils étaient maintenus par un cordon de gros blocs coulés.

L'arrière-bassin a été creusé dans une roche de gneiss quartzeux. Pendant la seconde période des travaux, on a employé un système de *grandes mines* dont les charges s'élèvaient de quatre à cinq mille kilogrammes. Ce genre de mines se compose d'un puits profond, à la partie inférieure duquel aboutissent deux galeries de bourrage. Par l'action de la poudre le sol se soulève sur un espace considérable, mais il ne se produit pas d'éclats comme dans les mines ordinaires; la masse rocheuse est désagrégée et fragmentée, ce qui permet aux ouvriers de la diviser et de l'enlever facilement.

Les dépendances de l'arrière-bassin comprennent sept *cales de construction* de longueurs variables, situées à l'ouest, et sept *formes*, dont deux de 140 mètres de longueur; quatre de ces formes peuvent recevoir tout armés les plus forts vaisseaux à toutes hautes mers.

On appelle formes, ou *formes de visite*, de grands bassins maçonnés, dans lesquels on fait entrer les bâtiments pour les réparer. Elles sont construites sur les bords mêmes des bassins de flot, avec lesquels elles communiquent directement par des écluses que l'on ferme au moyen de *bateaux-portes*. Les formes étant ainsi séparées du bassin, on les vide en employant des machines d'épuisement mues par la vapeur, jusqu'à ce que le vaisseau soit mis à sec et puisse recevoir à sa carène les réparations nécessaires.

# CHAPITRE DEUXIÈME.

## VAGUES ET RESSACS; ÉVALUATION DE LEUR PUISSANCE.

---

### Vagues.

Les vagues proviennent du vent, soit par son action directe, soit par les ondulations produites par cette action agissant en un point éloigné.

Il faut distinguer les mouvements des vagues au large de ceux qu'elles ont sur les côtes ou contre les ouvrages à la mer.

Au large, les vagues semblent s'avancer, en se dirigeant le plus souvent dans le sens du vent. Mais ce mouvement de translation n'est qu'apparent en très-grande partie, car un petit corps flottant s'élève et s'abaisse successivement avec la même vague en s'éloignant très-peu de la verticale, à moins qu'il ne donne prise lui-même au vent ou qu'il n'y ait courant. Dans ce dernier cas, la *vitesse de transmission* des vagues peut atteindre 20 mètres par seconde; c'est ce qui arrive fréquemment dans la baie de Saint-Jean de Luz. Leur hauteur va en croissant : 1° avec la violence du vent; 2° avec l'étendue du bassin où elles se propagent; 3° avec la profondeur de ce bassin. Par un très-grand vent, elle varie de 5 à 6 mètres dans l'Océan; de 3 mètres à 3,50 mètres dans la Méditerranée, et elle ne s'élève guère qu'à 2,50 mètres sur le lac de Genève. Dans les tempêtes, elles atteignent des hauteurs plus ou moins considérables.

En temps ordinaire, l'eau de la mer n'est agitée que sur une faible profondeur au-dessous du creux des vagues; cette profondeur est de 7 à 8 mètres dans l'Océan, de 5 mètres dans la Méditerranée, et de $1^{m}20$ sur le lac de Genève. L'on a été conduit à tirer ces conclusions en remarquant que les enrochements des côtes orientales de

l'Europe et les sables des rivages du lac précité commencent, aux profondeurs susdites, à se régler suivant l'inclinaison qu'ils affectent dans l'eau tranquille, et que l'on désigne sous le nom de *courbure d'équilibre*.

Sur les côtes, la mer agit contre le fond. Les vagues, arrêtées par celui-ci dans leur mouvement inférieur, frappent la plage, et leur mouvement étant décomposé suivant *ab* et *ac* (fig. 3), elles glissent sur le rivage, où elles s'élèvent à des hauteurs plus grandes que celles de leurs sommets.

Ainsi, le mouvement *vertical* d'ondulation produit sur les côtes une vitesse *horizontale* bien plus grande que celle qu'aurait l'eau en tombant de la hauteur des vagues.

Cette composante *ab* ou *a'b'* (figures 3 et 4), en se brisant contre un mur, un rocher, un obstacle quelconque, tend à corroder et à renverser ce qu'elle rencontre.

Une autre cause de dégradation provient du choc des composantes *ca, c'a'*, sur les fondations, radiers, talus d'enrochements, etc.

Enfin, la pression due à l'élévation des vagues, tant en CA (fig. 4) qu'en AB, ruine les ouvrages à la mer et les renverse.

Nous avons vu que le mouvement principal des vagues est vertical au large, et que le vent, violent même, ne leur imprime qu'une faible vitesse horizontale, dans son sens évidemment, car la marche des lames est dans la direction des grands vents et change avec elle ; ce fait est presque général.

Sur les côtes, les vagues reçoivent des vents une impulsion horizontale notable, dans le sens où ils soufflent et contrairement parfois au courant littoral de la côte considérée. C'est ainsi que sur les côtes du midi de la France, vers le Rhône, la mer agitée soulève des sables qui sont à moins de 8 mètres de profondeur, et les vagues chargées de ces matières suivent l'impulsion du vent régnant, de façon que ces sables vont se déposer vers le N.-E. quand il souffle du S.-O., et cela, quoique le courant, le long du littoral, se dirige en sens contraire.

### Ressacs.

L'on appelle généralement *ressac* toute forte agitation qui se produit à la surface de l'eau par le fait et à la suite du choc des vagues contre un oostacle fixe plus ou moins escarpé.

Comme l'agitation produite par le ressac donne lieu à des mouvements variés, l'on est convenu de donner à chaque ressac une désignation particulière suivant la nature du mouvement qui en résulte.

*Ressac vertical.* — Ce ressac a lieu quand les vagues frappent normalement, ou à peu près, un obstacle abrupt, tel qu'un mur vertical, une côte escarpée. Le mouvement se dirige alors vers le bas comme vers le haut de l'obstacle, en diminuant d'intensité avec la profondeur, attendu que l'agitation de la mer n'a lieu que sur une certaine épaisseur depuis la surface. Si donc un mur est fondé un peu au-dessous du niveau de la mer basse, le terrain naturel *ab* (fig. 5) sera plus ou moins attaqué par la composante *mn* du ressac ; et, s'il n'est pas assez résistant, il se produira un affouillement qui ruinera le mur *bmc*, comme on le voit généralement au pied des musoirs des jetées.

Ces affouillements n'existent pas toujours au pied *b* des ouvrages. Ainsi, à Cherbourg, au Havre, à Dieppe, etc., le ressac laisse une partie *mbp* peu agitée, où s'accumulent les matériaux provenant soit du large soit d'un affouillement en *p*. Cependant les ressacs verticaux en question, provenant de la composante *pq* de *mn*, ont presque toujours lieu au pied des obstacles abrupts.

*Ressac par réflexion.* — Lorsque les vagues frappent obliquement un obstacle fixe et abrupt, leur mouvement se décompose par le choc, et une partie de l'agitation se transmet horizontalement suivant un certain angle. Ainsi, la composante *pa* (fig. 5) produit des agitations horizontales, en sens inverse du mouvement des vagues, et qui se transmettent parfois à des distances très-notables. Si l'action de cette force horizontale vient à se produire contre un nouvel obstacle, elle y détermine à son tour un *ressac par réflexion*.

On peut citer comme exemple de ce phénomène, ce qui s'est passé dans l'avant-port de commerce de Cherbourg à la suite de quelques travaux. Le chenal d'entrée de ce port était formé autrefois par les jetées *abc* (fig. 6) et *ed;* une butte de rochers *mn* partant du quai Ouest s'étendait jusqu'à la jetée adjacente. L'on modifia ultérieurement ce dispositif par la démolition de la partie *bc* et des rochers *mn*. Dès lors, par les vents N.-O., les vagues qui frappaient la jetée *de* furent transmises par réflexion contre le mur *fm* du quai, et produisirent ainsi une agitation nuisible dans tout l'avant-port. Ainsi que l'indique

la fig. 39, on fut obligé de construire un épi à l'emplacement des anciens rochers et de modifier la jetée de l'Est.

Il est déjà facile de comprendre que la construction d'une jetée ou d'une digue peut amener dans un port, une rade, etc., un ressac plus ou moins violent contre certains ouvrages qui, auparavant, n'avaient rien à redouter.

Concluons que, si l'on sait mettre un port, un chenal, etc., à l'abri de l'action directe des mouvements du large, on a peu de données pour préjuger les ressacs variés que peuvent faire naître les nouvelles constructions maritimes. Aussi, ce n'est guère qu'après l'établissement de ces dernières que les ressacs qu'elles ont produits ont été connus et qu'on a tenté d'y porter un remède efficace.

*Ressac par transmission.* — Parfois, les vagues abandonnent leur direction primitive, par la rencontre des côtes ou d'obstacles artificiels qu'elles longent, en se détournant graduellement de façon à suivre une marche plus ou moins opposée à celle qu'elles avaient à leur arrivée du large.

D'autres fois, les vagues se jettent tout à coup de côté par suite d'une brusque interruption des môles ou autres obstacles destinés à les arrêter.

Des faits de ce genre se sont présentés dans le chenal du port des Sables d'Olonne (fig. 7). Quoique ce chenal soit abrité des vents du S.-O. par les rochers *mn* et la jetée *no*, les vagues poussées par ces vents au moment du plein contournent la jetée *no*, et arrivées en *o*, où l'obstacle cesse, se jettent latéralement dans le chenal, longent alors la grande jetée *ab*, la contournent en *bc*, et, se retournant presque d'équerre, tendent à porter leurs ondulations jusque dans le port. L'épi *de* en charpente a été construit pour rompre ces effets nuisibles de la *transmission latérale du ressac.*

*Clapotage.* — Le clapotage est l'agitation produite par la rencontre des ondulations des vagues avec un obstacle plus ou moins abrupt et en dehors des influences violentes. C'est un faible ressac, dans lequel la composante *mn* (fig. 5) est presque horizontale.

**Calcul de la puissance des vagues.**

Si l'on suppose la pression uniformément répartie sur la surface frappée, l'action de la mer, sur des blocs de forme semblable, croît comme les carrés de leurs dimensions. D'un autre côté, la stabilité dépendant du poids spécialement doit croître comme les cubes de ces dimensions. L'on peut en conclure que, pour chaque parage, il y a toujours une certaine masse contre laquelle les efforts de la mer seraient impuissants.

Il est facile de comprendre que cette masse immuable atteint des dimensions d'autant plus fortes qu'elle est plus exposée à l'action des tempêtes. Tel est le cas pour les matériaux des digues, jetées, musoirs, parfois même pour certains murs de quai.

Pour connaître le maximum d'effort des lames en un lieu donné, contre une surface verticale, il faudrait connaître les effets produits, en ces parages, par quelques tempêtes violentes. Les faits suivants, observés à Alger et à Cherbourg, donneront une idée de cette évaluation.

A Alger, des blocs de pierre placés à la suite les uns des autres servaient de parapet du côté du large sur le sommet de la jetée. Ces blocs étaient unis entre eux par du béton coulé dans les intervalles. Ils avaient $2^{m}00$ de hauteur et $1^{m}50$ d'épaisseur ou de queue; leur poids spécifique était 2,2.

En 1841, une tempête ébranla et disjoignit complétement cette maçonnerie. Transportés d'abord par glissement jusque vers le milieu de la jetée, les blocs ne tardèrent pas à être roulés et dispersés en tout sens.

Considérons l'action produite sur un mètre courant, ce qui correspond à deux mètres carrés de surface frappée. Si nous appelons $F$ la pression exercée par la vague sur un mètre carré, nous aurons (fig. 8) :

$$\text{Moment de la puissance} = 2\,F \times \frac{mn}{2} = 2\,F \times nb$$

$$\text{Moment de la résistance} = P \times \frac{na}{2} = P \times ca$$

Si ces moments avaient été égaux, les blocs seraient restés en équilibre ; mais, comme le moment de la puissance l'a emporté, nous poserons :

$$2\,F \times nb > P \times ca$$

$$F > \frac{P}{2} \times \frac{ca}{nb} \quad \text{ou bien} > \frac{6600^k}{2} \times \frac{0,^m75}{1^m}$$

$$F > 2475^k$$

Quant à la résistance au glissement, toujours par mètre carré de surface frappée, si nous admettons, avec MM. *Boistard* et *Peyronnet*, que 0,80 soit le coefficient de frottement de la pierre sur la pierre ou sur le béton, nous aurons :

$$2\,F > 0,80\,P$$
$$F > 2640^k$$

La pression exercée par la vague, sur un mètre carré, aurait donc été supérieure à $2640^k$.

Remarquons cependant que nous n'avons pas tenu compte de la liaison produite par le béton, qu'il serait difficile d'estimer à cause du retrait. Ce n'est pas le cas ici d'appliquer les coefficients de cohésion du mortier comme s'il s'agissait d'assises régulières se tassant insensiblement avec le mortier ou le ciment qui les relie. Si les blocs avaient été maçonnés en mortier hydraulique sur une base en maçonnerie, ce n'est plus la résistance par frottement mais bien celle par arrachement qu'il aurait fallu considérer. Dans ce cas, en n'admettant, suivant MM. *Boistard* et *Morin*, que $9400^k$ pour résistance moyenne transverse due à la cohésion, l'on aurait ici sur un mètre courant de parapet :

$$2\,F > \text{ou} < S \times 9400^k$$

où S représente la surface *na* de contact. D'où :

$$2\,F > \text{ou} < 1,50 \times 9400^k$$
$$F > \text{ou} < 7050^k$$

Voici une seconde observation faite à Alger, et qui a prouvé que, pour ces parages de la Méditerranée, les blocs de dix mètres cubes ne sont pas à l'abri de l'action subversive des vagues, comme on l'avait supposé très-longtemps.

Dans la tempête de novembre 1843, un bloc de $3^m40$ de longueur sur $2^m00$ de queue et $1^m50$ de hauteur, reposant par sa large base sur l'aire unie de béton du quai d'Alger, à 4 mètres au-dessus du niveau de la mer, a été soulevé par les vagues et poussé à plusieurs mètres. Son volume était pourtant de $10^{m^3}50$, et son poids de $22400^k$.

Prenant encore 0,80 pour coefficient du frottement, nous aurons :

$$5{,}10\ F > 0{,}80 \times 22400^k \quad \text{ou bien } F > \frac{17920^k}{5{,}1}$$
$$F > 3514^k$$

D'un autre côté, plusieurs observations faites à Cherbourg ont donné comme résultat maximum :

$$F > 3680^k$$

Cependant, dans ce dernier port, l'on est parvenu à connaître une limite supérieure de la puissance des vagues, en observant leur action sur divers blocs de béton, de douze à quinze mètres cubes chacun, provenant de la rupture d'une assise de $1^m60$ d'épaisseur coulée en 1788 sur les enrochements primitifs d'une des caisses coniques de M. *De Cessart* dont nous parlerons plus loin. Un de ces blocs existait encore en 1830 sur la branche Est de la digue, et avait par conséquent résisté pendant près de quarante ans aux plus terribles tempêtes. Il avait $4^m00$ de longueur sur $2^m25$ de largeur et $1^m40$ de hauteur ; en moyenne, il présentait une surface de $5^{m^2}60$ à la lame. Son volume était de $12^{m^3}60$ et son poids de $28980^k$.

Nous aurons donc ici, en adoptant le même coefficient :

$$5{,}60\ F < 0{,}80 \times 28980^k$$
$$F < 4140^k$$

D'après cette observation, l'on est convenu que, sur les côtes occidentales de l'Europe, des blocs en pierre, briques, ou béton, ont une stabilité complète lorsque leur volume atteint douze à quinze mètres cubes.

Il ne faudrait cependant pas en conclure que des blocs de forme parallélipipédique, coulés par une mer calme et roulant sur d'autres enrochements, se placent de prime abord dans une position définitive et immuable. Leur mouvement n'est terminé qu'après quelques gros temps, lorsque ces blocs se sont casés et disposés entre eux suivant l'inclinaison d'équilibre stable.

# CHAPITRE TROISIÈME.

## ACTION DE L'EAU DE MER SUR LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.

---

### Matériaux divers.

*Bois.* — Le bois se conserve très-bien dans l'eau de mer lorsqu'il y reste toujours noyé et qu'il n'est pas exposé aux attaques des *tarets*. Ceux-ci sont des vers rongeurs qui, lorsqu'ils entrent dans le bois, sont tellement petits qu'on peut à peine distinguer les trous par lesquels ils ont pénétré ; ils se développent à l'intérieur, et deviennent souvent gros comme le petit doigt. C'est à l'intérieur aussi qu'ils exercent leurs ravages, et il arrive parfois qu'une pièce ainsi attaquée se rompt avant qu'on ait remarqué la moindre perforation extérieure.

Les tarets sont originaires des Indes orientales ; ils ont été importés en Hollande, vers la fin du XVI^e siècle, par les vaisseaux de la Compagnie des Indes néerlandaises.

Ces vers rongeurs se tiennent toujours au-dessous des mers moyennes, entre les mi-marées et les basses mers ; on n'en voit pas au niveau des marées hautes, même les plus faibles. Parfois ils abondent dans certaine partie d'un port tandis qu'il y en a peu dans une autre. C'est ainsi qu'à Dunkerque ils ont attaqué fortement la jetée Ouest, laissant la jetée Est presque intacte. Déjà en 1837, c'est-à-dire, une douzaine d'années après sa construction, la première était minée par le pied au dessous de mi-marée au point qu'on dut couvrir et fortifier l'estacade par des pilots, des enrochements, etc.

Dans ce même port, les bois sont hors de service en moins de quinze

ans à cause des tarets. A Lorient, des parties n'ont duré que trois ans; au Havre, des estacades ont été dévorées en six mois.

Outre les tarets, il y a dans la mer d'autres ennemis à redouter pour la conservation des bois; tels sont les *limnoria*, qui sont à peine gros comme une épingle, et qui ne pénètrent dans l'intérieur des pièces qu'après en avoir criblé la surface d'une infinité de petits conduits cylindriques séparés par des cloisons presque imperceptibles.

*Fer.* — Noyé, mouillé par intervalles, ou même exposé seulement aux émanations marines, le fer s'oxyde à la surface, puis se corrode à l'intérieur. L'action électrique joue un grand rôle en activant cette décomposition. Ainsi, M. *Minard* rapporte qu'il a trouve en 1811 la plupart des boulons et des chevilles du radier de l'écluse de Flessingue, construite en 1740, fortement striés par l'action électrique, au point de présenter en section la forme d'une étoile au lieu d'un cercle.

Ces effets de corrosion dépendent de la nature du fer forgé que l'on peut considérer comme formé de plusieurs lames en contact, non homogènes entre elles puisque ordinairement elles contiennent des parties grenues et d'autres nerveuses.

L'action est parfois très-rapide; ainsi les boulons du radier de l'écluse de chasse de Dunkerque, construite en 1825, étaient déjà hors de service en 1836; et en 1837, les ferrures de manœuvre des portes tournantes de la même écluse étaient fortement rongées, quoiqu'elles eussent été peintes plusieurs fois et qu'elles ne fussent mouillées que par les fortes tempêtes; des fers de $0^{m}015$ d'équarrissage étaient réduits de moitié.

*Fer zingué.* — Dans certains parages, l'on a employé le fer zingué avec succès; dans d'autres, il s'est altéré assez rapidement, sans doute par suite de l'action électrique. Cependant, quoique jusqu'aujourd'hui l'on n'ait obtenu aucune conclusion certaine, il est avantageux de l'employer de préférence au fer non préparé, la différence en prix étant minime.

*Fonte.* — Ce métal s'altère par un long séjour dans l'eau de mer. Des canons en fonte, retirés après vingt-cinq ou trente ans d'immersion, ont l'apparence de la plombagine et s'entaillent au couteau.

*Cuivre, bronze.* — Le cuivre et le bronze ne s'oxydent qu'à la surface sous l'action des eaux marines; ils ne semblent pas éprouver

d'autre altération ni perdre de leur ténacité. Mais il faut éviter de les mettre en contact avec d'autres métaux; cette circonstance hâte la corrosion en produisant l'effet d'une pile électrique tant sur les métaux que sur les sels marins de toute espèce.

*Mortiers et bétons.* — Les mortiers marins fabriqués avec des chaux hydrauliques et des pouzzolanes *naturelles,* telles que celles d'Italie ou d'Andernacht (trass), provenant de produits volcaniques ou pseudo-volcaniques, ont résisté depuis des siècles à l'action de l'eau de mer, et les premières observations de cette action destructive ne datent que de 1842, c'est-à-dire de l'époque où, suivant les principes posés par M. *Vicat,* on a introduit dans la composition des mortiers marins de nouvelles chaux hydrauliques, des pouzzolanes artificielles et de nouveaux ciments dont l'emploi n'était pas sanctionné par l'expérience. En substituant à celle-ci les essais du laboratoire, l'on a été conduit, par une fausse appréciation, à des désastres nombreux dans les constructions maritimes.

Malgré les résultats désastreux des principes de M. *Vicat,* quelques ingénieurs cherchent en vain à éluder la sanction du temps et de l'expérience en mer libre. M. *Vicat* lui-même persiste à donner la préférence aux expériences du laboratoire sur tout autre procédé, convaincu, dit-il, « que les essais en petit font mieux ressortir les effets chimiques que les épreuves en grand et à mer libre. »

Malheureusement la question des mortiers marins est bien plus complexe qu'il ne paraît à première vue. Les essais du laboratoire peuvent sans doute être utiles pour connaître les premières réactions des matériaux, mais elles ne peuvent remplacer l'action du temps et des éléments minéralogiques, botaniques et zoologiques que contient l'eau de mer libre, pas plus que les influences d'agitation, de température, de lumière, de profondeur, etc., qui nous sont inconnues et que l'on ne saurait reproduire dans un baquet.

On peut résumer comme suit la méthode de M. *Vicat,* pour essayer la résistance des mortiers à l'action destructive de l'eau de mer (1).

(1) *Recherches sur les causes chimiques de destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer et sur les moyens d'apprécier leur résistance à cette action.* Paris, 1857.

Après avoir trituré le mortier à essayer, on le met dans un vase de verre, qu'il doit remplir complétement, et qu'on recouvre d'un disque pour empêcher le contact de l'air. Au bout d'un mois environ, le mortier est dur. Dégagé du verre, que l'on casse, il est plongé alors dans de l'eau contenant quatre à cinq millièmes de sulfate de magnésie anhydre. Par suite de la décomposition qui s'opère, l'eau se charge de sulfate de chaux, dont on constate la présence par l'oxalate d'ammoniaque qui donne un précipité d'oxalate de chaux. On renouvelle l'eau magnésique jusqu'à ce qu'il ne se forme plus de précipité, et même au delà de cette limite pour plus de sécurité.

Si, au bout de dix mois, l'échantillon n'a pas donné à l'extérieur des signes de destruction, on le brise pour vérifier l'intérieur; si celui-ci est bien conservé, on traite quelques fragments ainsi brisés de la même façon que l'échantillon entier. Enfin, « lorsque ces frag-
« ments se maintiennent intacts pendant un temps déterminé dont
« *la suite nous donnera la limite*, dit M. *Vicat*, on peut en conclure
« une certitude ou une *probabilité* seulement de résistance indéfinie
« en mer libre. »

L'auteur ajoute : « La question de savoir combien de temps doivent
« durer ces essais, pour donner une certitude de stabilité indéfinie
« est fort difficile; c'est à peine si nous osons, pour les mortiers à
« chaux de l'Ardèche, fixer une limite minima de deux ans. »
Encore, cette faible affirmation ne s'applique-t-elle qu'aux mortiers à employer dans la Méditerranée. Quant à ceux qui pourraient être adoptés sur les côtes de l'Océan ou de la Manche, M. *Vicat* déclare :
« qu'il n'a pu trouver jusqu'ici, sur ces côtes, des exemples assez
« nombreux, assez authentiques d'emploi de mortiers semblables
« à ceux de la Méditerranée *pour en tirer une conclusion quelconque.* »

Il est cependant plus positif à l'égard des ciments : « Il y aura,
« dit-il, pour eux garantie certaine de durée en mer libre quelconque,
« toutes les fois qu'immergés sous forme prismatique, ils y con-
« servent sans fissures quelconques la vivacité des arêtes pendant
« vingt mois. »

Ainsi, à l'exception des ciments, l'incertitude des conclusions de M. *Vicat* n'autorise l'emploi d'aucun mortier nouveau. Bien plus, l'auteur avoue que si l'essai est insuffisant pour accepter certains

mortiers il n'est même pas susceptible d'indiquer ceux qu'il faut rebuter ; en effet, il ajoute : « Nous ne prétendons pas cependant « qu'il faille renoncer à employer tous les composés hydrauliques « que notre mode d'investigation signale comme destructibles, *s'ils « ont en leur faveur, depuis un grand nombre d'années, le témoi- « gnage contraire de la mer libre.* »

On ne peut pas mieux avouer l'incertitude de la méthode d'essai dans le laboratoire ; incertaine pour faire adopter les mortiers qui semblent bons, elle ne l'est pas moins pour faire repousser ceux qui paraissent mauvais.

L'exemple suivant complétera notre critique du procédé d'essai inventé par M. *Vicat;* il prouvera à l'évidence que ce procédé n'aboutit pas seulement à l'incertitude, mais qu'il repose sur une appréciation tout à fait inexacte des phénomènes réels qui se passent en mer libre.

En 1853, l'on arracha des blocs formant la jetée du Nord à Alger et *immergés depuis dix-sept ans,* quelques fragments qui furent plongés simplement dans l'eau de mer contenue dans des baquets. Au bout de quinze jours, ces fragments étaient détruits, excepté la partie qui touchait à la mer libre. Or, voici ce que dit M. *Vicat* sur ce même mortier d'Alger : « Une gangue ainsi composée ne pourrait « résister à l'immersion immédiate. Il y a plus, elle serait même « attaquée dans l'eau de mer, comme on l'emploie pour les essais du « laboratoire, quoique immergée après un ou deux mois de fabrica- « tion (1). »

Ainsi, un mortier employé depuis 1836 jusqu'en 1852 à faire des milliers de blocs en béton inattaquables par l'eau de la pleine mer aurait été impitoyablement déclaré mauvais et inadmissible si on l'avait exposé, dès l'origine, aux essais de M. *Vicat.*

Il est donc bien avéré que les opérations chimiques de laboratoire ne peuvent suppléer à la mer, et qu'il est impossible de songer à réunir dans des expérimentations isolées tous les éléments si variés et si complexes qui doivent se trouver en présence.

Le seul moyen de connaître la résistance d'un mortier marin est de l'immerger en mer libre dans les parages où il doit être employé.

(1) *Annales des ponts et chaussées,* 1849, page 260, deuxième semestre.

En plaçant ainsi les mortiers d'essai dans les mêmes circonstances où se rencontrent les phénomènes dont on veut observer la marche, on les soumet à toutes les influences connues et inconnues auxquelles ils peuvent être exposés lorsqu'ils seront employés dans les constructions maritimes.

Les bétons coulés se couvrent généralement de végétations marines et de coquillages qui y forment une croûte adhérente, et dont la quantité varie avec les parages et les climats. Ces excroissances se produisent parfois avec une grande rapidité pendant la construction même des ouvrages. Il est alors de toute nécessité de les arracher complétement avant de procéder au coulage de nouvelles couches ou à l'établissement des maçonneries.

Quant aux mortiers qui ne sont pas noyés, mais qui sont très-rapprochés des côtes, il arrive fréquemment qu'ils se décomposent et se recouvrent d'une efflorescence de $CO^2.NaO$, provenant de la décomposition du $CO^2.CaO$ par l'hypochlorate de soude $ChO^4.NaO$ répandu dans l'air sur les bords de la mer.

Les eaux de la Méditerranée possèdent à un moins haut degré les principes de destruction des mortiers que celles de l'Océan et de la Manche; cela doit être attribué sans doute à leur composition qui paraît être un peu différente, à leur température plus élevée de 4 à 6 degrés et à leurs courants 4 fois moins rapides sur les côtes.

L'emploi de l'eau de mer est généralement défendu pour la fabrication des mortiers; ce principe ne doit cependant pas être absolu. Le mortier fabriqué avec cette eau a une dessiccation très-lente, et il produit pendant assez longtemps, à la surface des maçonneries, des efflorescences salines qui peuvent rendre son emploi mauvais pour les maisons d'habitation, ou même pour les parements, mais qui sont sans importance pour la plupart des massifs et autres constructions maritimes.

D'après *Bélidor*, on doit se servir de l'eau de mer; en effet, plusieurs expériences faites à Calais semblent prouver qu'elle aurait quelque avantage.

Les mortiers de la digue de Cherbourg sont fabriqués à l'eau douce; or M. *Minard* rapporte qu'en ayant rompu et goûté plusieurs frag-

ments, il les trouva tous fortement salés, à l'exception des bétons énergiques dont la prise avait été très-prompte.

*Pierres.* — Quelque dures et polies que soient les pierres, elles ne tardent pas à se couvrir, comme les bétons coulés, de végétations marines plus ou moins vivaces et abondantes suivant les localités. Cette croissance rapide est souvent une cause de retards fâcheux dans les travaux en pleine mer qui, de leur nature, sont essentiellement discontinus par suite des marées et des lunaisons. Parfois il suffit de quelques jours d'arrêt pour qu'on retrouve la surface des maçonneries ou des rochers complétement recouverte d'un *goëmon* naissant, offrant l'aspect d'un chevelu blanchâtre qui verdit rapidement. On est forcé de l'enlever pour que la maçonnerie suivante puisse faire prise avec la partie commencée ou avec la roche qui sert d'assiette au soubassement. Lorsque celle-ci se compose de pierres ou de roches calcaires, on se contente d'en gratter la surface avec de petites grattes à main. Mais ces outils ne sont plus efficaces sur les pierres granitiques ; il faut alors avoir recours à la pointe d'un marteau de tailleur de pierre. Par suite, on use un grand nombre de pointes et on perd beaucoup de temps ; il peut donc arriver, tant qu'on est dans les parties basses, qu'on passe la marée à nettoyer le rocher, et que l'état de la mer changeant le lendemain, le travail de nettoyage de la veille devienne peine perdue.

Pour obvier à cet inconvénient, M. l'ingénieur *Martin* propose la méthode suivante qu'il a employée avec succès dans l'établissement, sur les rochers granitiques des Barges, des premières maçonneries du phare construit de 1858 à 1861 sous sa direction (1).

Recherchant comment le goëmon peut prendre racine sur une roche granitique, et réfléchissant à cette action puissante de l'eau de mer, considérée comme fournissant des éléments calcaires aux nombreux dépôts qui se forment dans son sein, il fut conduit à croire que la racine du goëmon se fixe sur le rocher par un élément calcaire, et que, par conséquent il était probable que l'acide chlorhydrique serait un agent efficace de décapage Ce qui confirma encore l'auteur dans son idée, c'est que les grands goëmons que l'on arrache emportent tou-

(1) *Annales des ponts et chaussées*, tome XIX.

jours sur leurs racines des détritus blanchâtres et pulvérulents. L'expérience vérifia ces prévisions, et le décapage en grand entrepris sur le rocher et sur les assises inférieures en granit fut couronné d'un succès complet.

L'opération s'exécute de la manière suivante. On verse l'acide sur le rocher; puis, avec des balais durs ou des brosses de chiendent, on le répand partout en frottant, et au bout de dix minutes on a un décapage satisfaisant. Quand la couche de goëmon est très-épaisse, il est bon d'enlever d'abord un peu le dessus en le grattant avec une pelle afin que les racines soient plus facilement atteintes par l'acide. On lave ensuite à grande eau, et à plusieurs reprises, pour faire disparaître l'élément dissolvant, à moins toutefois que la marée ne se charge de ce travail.

L'acide chlorhydrique étant très-peu coûteux, ce procédé joint à l'avantage de la rapidité d'exécution, si essentielle dans les travaux à la mer, celui d'être plus économique que le grattage à la main.

L'on avait déjà antérieurement essayé le décapage de la roche par l'acide sulfurique, mais ce procédé n'avait pas donné de résultats satisfaisants; du reste, il ne serait nullement praticable tant en raison de la cherté de ce produit qu'à cause des précautions qu'exigeraient son transport et son emploi.

# CHAPITRE QUATRIÈME.

## CONSERVATION DES BOIS NOYÉS.

---

### Méthodes diverses.

*Préliminaires.* — Les dégradations qu'éprouvent les bois proviennent de deux causes distinctes : la première résulte de leur constitution même ; la seconde se produit par l'action des vers rongeurs.

Toutes les altérations dues à la nature des bois proviennent des matières solubles qu'ils contiennent ; c'est par ces dernières que commence toujours la destruction. Il s'agissait donc de déplacer ces matières, pour les remplacer par un liquide imputrescible ; ou bien, de transformer au sein du bois la substance soluble en corps insoluble. C'est pour réaliser l'une ou l'autre de ces deux modifications que l'on a employé l'injection de substances salines ou créosotées.

Le principal ennemi des bois noyés est le taret. Les autres vers sont bien moins puissants et moins rapides dans leur œuvre de destruction. Aussi, pour ces derniers, on se contente d'en préserver les charpentes au moyen d'un revêtement additionnel en planches de $0^m03$ que l'on renouvelle quand il est dévoré.

Contre les tarets l'on a employé les préservatifs suivants : 1° le mailletage ; 2° le doublage ; 3° les enduits ou ciments.

*Injection des bois.* — C'est à M. *Boucherie* qu'on doit les premières recherches sur cette importante question. Au double point de vue de l'action préservatrice et du bon marché, il employa le pyrolignite de fer brut, ou acétate de fer impur qui contient une grande quantité de créosote.

Pour l'introduire dans le corps de l'arbre, M. *Boucherie* a proposé deux méthodes. La première, s'appuyant sur la force aspiratrice de la sève, ne pouvait s'employer qu'à certaines époques de l'année, et sur des arbres sur pied ou récemment abattus. La seconde, qui peut s'appliquer en toute saison, consiste à déplacer la sève par le haut en y disposant des réservoirs en toile imperméable remplis de la dissolution saline adoptée.

L'on a remarqué que l'aspiration, dans le premier procédé, est plus énergique au début, et décroît rapidement à mesure qu'on s'éloigne de la première journée. Au bout de 10 jours, elle est insensible; l'imprégnation est alors complète pour quelques essences. Néanmoins, dans quelques bois blancs, on trouve un tube central, de diamètre variable, qui résiste à l'imprégnation; dans les bois durs, celle-ci n'atteint souvent pas les parties centrales du cœur.

Dans l'une et l'autre de ces méthodes, les bois les plus légers ne sont pas ceux qui se laissent pénétrer le plus facilement; ainsi le peuplier résiste plus que le hêtre et le charme.

L'on a employé des sels très-divers pour la conservation des fibres ligneuses; tels sont les chlorures de sodium, de calcium et de zinc; l'hydrochlorate de mercure ou le sublimé corrosif; le sulfate et le pyrolignite de fer; un mélange de sulfure de barium et de sulfate de fer; le sulfate de cuivre; la créosote impure, obtenue par la distillation du goudron de houille et qui ne contient guère plus de 2 pour 100 de créosote.

Ces deux derniers antiseptiques sont les plus fréquemment employés aujourd'hui. En France, où la créosote est d'un prix trop élevé, on fait généralement usage du sulfate de cuivre.

Diverses modifications ont été apportées au système de M. *Boucherie;* elles peuvent se classer comme suit :

1° *Injection par immersion.* — Dans ce procédé, dû à MM. *Margary* et *Knab,* on s'est contenté d'immerger simplement le bois dans un bain de sulfate de cuivre. La dissolution se composait de 17 à 18 kil. de sel par mètre cube d'eau, et la durée de l'immersion était d'environ 2 jours par chaque pouce d'épaisseur. Mais le sulfate ne pénétrait pas au delà de l'aubier, et l'on a renoncé à ce procédé, dont les avantages n'ont point paru compenser la dépense.

2° *Par filtration avec pression.* — Cette méthode est simple; elle s'applique à des bois en grume, quelle que soit la saison. Il suffit de surmonter le sac imperméable qui contient le liquide antiseptique d'un tube rempli de la même dissolution, de façon à établir une pression suffisante.

Ce procédé est mis en usage, dans quelques places fortes de Belgique, pour prolonger l'existence des bois noyés ou exposés à des alternatives de sécheresse et d'humidité. Il est peu coûteux, le sulfate de cuivre ne revenant guère qu'à 1 fr. 25 cent. le kilogramme.

Les bois à imprégner sont pris en grume ou grossièrement équarris à la hache, et immergés dans l'eau pendant vingt-quatre heures au moins. Après avoir scié au gros bout une tranche mince, on dresse la pièce verticalement contre un échafaudage, le petit bout reposant sur des tringles placées sur une rigole ou un récepteur quelconque. Il reste à coiffer le gros bout d'un capuchon en cuir ou en plomb serré hermétiquement sur la circonférence et luté au moyen d'argile. C'est dans ce capuchon que l'on verse la dissolution de sulfate de cuivre, qui contient de sept à huit kilogrammes de sel par mètre cube à injecter.

Une pièce de bois est jugée suffisamment injectée lorsque la teinte verte arrive aux nœuds et à la partie inférieure. Si le liquide du capuchon reste à peu près stationnaire, et que l'on n'aperçoive qu'un faible écoulement de sève par le bout inférieur, il est bon de scier une nouvelle tranche mince au gros bout pour favoriser l'absorption.

Cette méthode s'emploie sur une grande échelle au chemin de fer du Nord pour la préparation des traverses.

La pièce de bois est en grume et de la longueur de deux traverses ordinaires; on la couche sur le sol, ses extrémités reposant sur deux supports. Après avoir pratiqué au milieu de la pièce un trait de scie qui s'arrête à une petite distance de la surface inférieure, on soulève ce milieu au moyen d'une cale que l'on chasse suffisamment pour faire ouvrir le trait de scie de façon qu'on puisse y introduire un bout de corde plus épais au milieu qu'aux extrémités. La cale étant ensuite retirée, il arrive que la corde fortement comprimée par le poids de la pièce forme du trait de scie une cavité fermée sur tout le pourtour. On fait arriver alors la dissolution de sulfate de cuivre dans cette

cavité par un trou dans lequel on introduit un entonnoir qui se prolonge par un tube en caoutchouc. La sève sort par les extrémités de la pièce, et elle est remplacée par la dissolution saline. Celle-ci se fait dans une barrique placée sur un plancher établi à 5 mètres de hauteur; un robinet sert à régler son arrivée dans la partie supérieure du tube. Le liquide qui suinte par la corde et par les extrémités du bloc de bois se rend par des rigoles dans une seconde barrique, d'où on le remonte dans la première au moyen d'une pompe.

L'on emploie d'ordinaire 5k50 de sulfate par mètre cube de bois à préparer. La dissolution pénètre généralement dans toute la masse du bois; cependant, dans le hêtre, il reste au centre une petite partie cylindrique non imprégnée, que l'on a soin d'enlever quand on débite les traverses.

Voici, d'après M. *Maniel*, les principales conditions que doivent remplir les bois préparés par le procédé de M. *Boucherie* plus ou moins modifié.

1° Les bois doivent être sains, bien droits, sans trace de pourriture, de gélivure ou de roulure; car la dissolution, qui suit naturellement le chemin le plus facile, s'écoulerait par les fentes sans pénétrer le bois.

2° Les arbres abattus du mois de mars au mois de décembre de l'année précédente, doivent être mis en préparation du commencement de mars à la fin de mai; tandis que ceux qui sont coupés de décembre à mars doivent recevoir le sulfate de cuivre dans les quinze jours qui suivent l'abatage.

3° Les branches et la tête des arbres doivent être rognées aussitôt après la coupe.

4° Il faut laisser à chaque bout des pièces une longueur d'au moins 0m10 en sus de ce qu'elles doivent conserver définitivement, afin de pouvoir les rafraîchir au moment de la préparation.

5° La culée de l'arbre et la portion de la tête trop petite pour servir à la confection des traverses ou autres pièces à injecter ne doivent être coupées qu'au moment où les blocs vont être enlevés pour être mis en chantier.

Toutes ces précautions ont pour but, d'après l'auteur, d'éviter l'accumulation, dans les fibres, de l'albumine coagulée par la dissolution

antiseptique ; ces agglomérations solides auraient pour effet de former dans les canaux séveux une série de diaphragmes capables d'équilibrer pendant plusieurs heures une colonne de liquide de dix mètres de hauteur, en opérant sur des bois tronçonnés depuis deux ou trois jours, et pourraient même s'opposer complétement à l'injection des bois qui auraient séjourné au soleil pendant de fortes chaleurs.

La durée de la préparation est de quarante-huit à soixante heures pour les bois de dimensions moyennes, abattus en saison convenable, et des essences telles que le charme, le hêtre, le platane, le bouleau et le sycomore. Il faut de soixante à quatre-vingts heures, et quelquefois cent heures, pour préparer des blocs en hêtre de $0^m60$ à $0^m80$ de diamètre et de $2^m50$ à $2^m70$ de longueur.

On admet généralement que la durée de la préparation varie en raison du carré des longueurs et en raison directe du diamètre.

Les bois à cœur, comme le chêne, l'orme, le mérisier, tous les peupliers, les résineux et l'acacia sont plus longs à préparer; ils exigent de cinq à huit jours.

3° *Par le vide et la pression.* — Dans cette méthode, employée au Mans par MM. *Legé* et *Fleury-Pironnet,* le bois est traité en vase clos, dans lequel on fait agir successivement le vide, puis une forte pression atmosphérique.

L'appareil se compose d'un cylindre en cuivre dont une des extrémités est terminée par une calotte hémisphérique rivée, et dont l'autre bout, légèrement bombé, est mobile au moyen d'une charnière.

Une locomobile de la force de dix à douze chevaux sert de générateur à la vapeur que l'on doit injecter dans le cylindre, et de moteur pour les pompes à air ou à injection.

Les bois à préparer se placent sur de petits trucs en cuivre et bronze, que l'on introduit dans le cylindre. Le fond mobile est ensuite fixé par des mâchoires à vis de pression, et le cylindre est mis en communication avec la chaudière, de manière à le faire traverser par un courant de vapeur, à laquelle on donne issue dans l'atmosphère par un robinet placé à la partie inférieure de l'appareil.

Cette première opération a pour but d'échauffer le bois et de le dilater de façon à le débarrasser d'une partie des gaz et des liquides du tissu ligneux. Dès que la vapeur n'entraîne plus de matières étran-

gères, on arrête son action en fermant les robinets, et on met le cylindre en communication avec un condenseur dans lequel on fait arriver un courant d'eau froide, qu'on évacue avec des pompes à air placées sur la locomobile. Cette circulation d'eau étant ensuite interrompue, on fait le vide, qu'on maintient environ un quart d'heure à la pression de $0^m05$ à $0^m10$ de mercure.

On tourne alors le robinet qui ouvre à la dissolution de sulfate de cuivre l'entrée du cylindre. Ce liquide, qui est à une température de 45° à 75°, est refoulé et comprimé dans le cylindre à l'aide d'une pompe foulante que l'on fait agir jusqu'à ce que la pression s'élève et se maintienne pendant une demi-heure entre 9 et 15 atmosphères. Cette opération terminée, on laisse écouler le liquide et on retire les trucs chargés de bois. Tout le travail de préparation n'exige que deux heures et demie environ.

La dissolution contient d'ordinaire 2 kil. de sulfate de cuivre pour 100 litres d'eau. Par l'opération, le poids du sel contenu dans cette dissolution ne diminue guère que de 0,013 de son poids primitif.

Ce procédé présente plusieurs avantages sur celui de M. *Boucherie;* il est aussi moins coûteux, car il ne revient qu'à huit francs environ au mètre cube, tandis que celui de M. *Boucherie* coûte de quatorze à quinze francs.

Il résulte d'expériences faites sur des bois préparés par la méthode de MM. *Legé* et *Fleury* :

1° Que pour le chêne, l'aubier sec ou frais s'injecte complétement; que le cœur frais ne s'imprègne pas d'une manière appréciable, et que le cœur s'injecte très-inégalement;

2° que le frêne se comporte comme le chêne;

3° que l'orme s'injecte d'une manière homogène, à l'exception de quelques petits nœuds et de quelques veines de bois mort où les vaisseaux sont obstrués;

4° que l'injection du hêtre est très-complète ; quoique moins abondante dans les parties denses du bois et dans les nœuds, elle est partout apparente, sauf cependant comme dans l'orme, pour quelques veines de bois mort, d'une teinte généralement plus blanche que le reste. Les parties où un commencement d'échauffement ou de pourriture sèche se manifeste, absorbent un excès de dissolution ;

5° que le charme, l'aune, le platane et l'érable sycomore se comportent comme le hêtre;

6° que, dans le peuplier sec ou à demi-sec, la pénétration est complète quoique moins homogène que celle du hêtre, mais que le peuplier frais dont l'eau de sève n'a pas eu le temps de s'évaporer s'injecte mal; il ne convient donc d'injecter ce bois que trois ou quatre mois après l'abatage;

7° que le bouleau présente les mêmes résultats que le peuplier;

8° que, dans le pin maritime, le pin silvestre et le sapin du nord, l'aubier s'injecte complétement. Les cinq ou six premières enveloppes concentriques du cœur s'injectent également bien, mais les couches plus centrales paraissent tout à fait réfractaires, plus même que celles du chêne;

9° qu'il faut renoncer à injecter l'acacia et le châtaignier.

L'imprégnation, par les méthodes précédentes, a pu produire des résultats assez satisfaisants dans certains cas, par exemple pour les traverses de chemins de fer; mais son influence a été insignifiante lorsqu'elle a été appliquée à des bois destinés aux constructions maritimes. Divers procédés ont été préconisés pour la préparation de ces derniers; l'objet principal que se sont proposé les auteurs était de coaguler les parties albumineuses par des sels métalliques pour en arrêter la putréfaction. On peut citer les procédés suivants comme ayant donné les résultats les plus avantageux :

celui de *Kyan* par le chlorure de mercure;

celui de *Burnett,* par le muriate de zinc;

celui de *Payne,* par le sulfate de fer et le muriate de chaux;

celui de *J. Bethell,* par la créosote brute.

Les trois premières méthodes, quoique supérieures à celles de M. *Boucherie,* plus ou moins modifiées, présentent encore de sérieux inconvénients, surtout pour les bois noyés.

D'abord, quand les dissolutions des sels métalliques sont injectées dans le bois en quantité suffisante pour se cristalliser, leurs cristaux percent les pores, occasionnent des éruptions de la fibre, et lorsque, par la suite, le bois se mouille, ils se dissolvent laissant ainsi de grands espaces vides et ouverts à l'eau. L'élasticité du bois s'altère, et il devient sujet à se fendre.

De plus, les sels métalliques étant incapables de fermer les pores du bois, la fibre reste toujours exposée à l'action de ce qu'on appelle *eremacausis* ou oxydation ligneuse, après que l'albumine a été précipitée.

Enfin, les acides employés peuvent avoir une action corrosive sur le fer des boulons et autres attaches métalliques.

Quant à la résistance des pièces ainsi préparées contre les ravages des tarets, limnoria, etc., l'expérience a prouvé qu'elle est insignifiante, les poisons ou autres substances préservatrices absorbés par le bois à l'état fluide étant facilement enlevés, soit par la pluie soit par l'eau de mer. En outre, comme la propriété conservatrice de ces sels résulte de la faculté qu'ils ont de coaguler la partie albumineuse de la sève, cette combinaison détruit l'activité du poison qu'ils représentaient. C'est même sur cette coagulation albumineuse qu'est basé le traitement des empoisonnements par les sels minéraux.

Des expériences faites en 1848, à Southampton, sur différentes espèces de bois, ont prouvé que les pièces saturées de la dissolution *Payne* ne résistent pas plus à l'attaque des vers rongeurs que certains arbres non préparés, parmi lesquels on peut citer l'orme d'Amérique.

Il nous reste à considérer le système de préparation de *J. Bethell*, qui est appelé, d'après toute probabilité, à réaliser la solution de l'important problème de la conservation des bois.

*Créosotage des bois; systèmes de J. Bethell.* — Les procédés de *J. Bethell* reposent sur l'emploi d'une substance que l'on obtient par la distillation du goudron de houille, et qui se compose d'une certaine quantité d'huiles bitumineuses combinées avec une faible portion de créosote. Ces huiles donnent au bois une odeur fétide et persistante qui en rend l'emploi assez désagréable.

La créosote impure employée en Angleterre est extraite du goudron de houille, produit des usines à gaz. On retire environ trente à quarante de créosote brute pour cent de goudron. Le résidu est à peu près sans valeur. Le goudron y coûte 1 à 1,5 denier (dix à quinze centimes) le gallon (4,54 litres); lorsque son prix est de 1 denier, la créosote revient à 3,5 deniers (trente-cinq centimes).

L'absorption est de 1 gallon de créosote par pied cube ($0^{s},03428$) de bois. Le mètre cube préparé coûte donc environ $0^{fr}.35 \times 30 = 10^{fr}.50$.

Deux procédés sont mis en usage par *J. Bethell,* pour imprégner le bois de créosote. On lui doit aussi une troisième préparation par le sulfate de cuivre et le goudron brut.

Le premier procédé consiste à placer les blocs dans un séchoir, et à y faire passer les produits de la combustion des matières employées pour le chauffer. Les bois étant ainsi rapidement séchés s'imprègnent en même temps d'une partie de l'huile volatile et de la créosote contenues dans les gaz dégagés par le combustible employé. Dès qu'ils sont convenablement secs, on les sort du séchoir pour les plonger immédiatement dans un réservoir ouvert plein de créosote bouillante.

Dans le second procédé, le bois est placé dans un fort cylindre en tôle ou en fer, dans lequel on fait passer de la vapeur pendant quelque temps; celle-ci amollit le bois, facilite la sortie de la sève, et produit, en se condensant, un vide partiel que l'on rend plus complet par l'action de pompes pneumatiques. Le cylindre est mis alors en communication avec un bassin rempli de créosote chauffée à 90° *Fahrenheit.* Cette huile pénètre naturellement dans les pores du bois vides d'air, et l'on augmente cette pénétration en foulant au moyen de pompes jusqu'à une pression d'environ dix atmosphères. Le bois reste exposé à cette pression pendant trois heures; après l'opération, son augmentation en poids est d'à peu près neuf livres.

Un autre procédé, dû aussi à *J. Bethell,* consiste à injecter le bois avec du sulfate de cuivre, ou tout autre antiseptique, dans un cylindre en cuivre analogue à celui que nous avons décrit précédemment; à le dessécher ensuite dans une étuve de façon à ne laisser dans le bois que le sel cristallisé ou combiné avec l'albumine; enfin, à le plonger, au sortir de l'étuve, dans une chaudière contenant du goudron brut. Cette préparation reviendrait encore à onze francs environ.

Voici les conditions imposées pour le créosotage des bois destinés à la construction des musoirs en charpente de l'écluse d'accession des nouveaux bassins d'Anvers.

La créosote brute était le produit de la distillation d'un goudron de gaz de première qualité.

Le cylindre en tôle destiné à recevoir les bois devait avoir au moins 13$^{m}$50 de longueur, afin de pouvoir contenir 10 mètres cubes de bois

au minimum. A l'une de ses extrémités, un obturateur mobile permettait de le fermer hermétiquement. Il était en outre muni :

d'un indicateur de vide à colonne de mercure;

d'un indicateur de vide à cadran ;

de deux manomètres à pression ;

d'une soupape à levier;

des tubulures nécessaires pour introduire ou retirer le liquide et produire le vide ou la pression.

Dans le cas où la préparation aurait lieu en hiver, le cylindre devait être garni d'un serpentin à vapeur appliqué sur sa paroi intérieure.

La créosote à mettre en œuvre était placée sous le cylindre, dans un réservoir dont les dimensions étaient en rapport avec ce dernier. Ce réservoir contenait la créosote nécessaire aux manipulations d'une journée. La surface horizontale du liquide était telle, que la diminution résultant d'une préparation correspondait à une tranche d'au moins 5 centimètres.

Le réservoir était muni :

d'un serpentin à vapeur, permettant d'élever rapidement la température de la créosote;

d'un thermomètre centigrade;

d'un flotteur à échelle graduée en centimètres et millimètres.

Après avoir rempli de bois le cylindre en tôle et l'avoir fermé, on y faisait le vide au moyen de la machine pneumatique jusqu'à ce que l'indicateur indiquât une pression de 0,20 à 0,25 de mercure. Ce vide ayant été maintenu pendant une heure, on y laissait entrer la créosote, par l'effet de la pression atmosphérique d'abord, puis au moyen de pompes foulantes, jusqu'à ce que les vides du cylindre fussent entièrement remplis. Ces pompes continuaient à fonctionner, en maintenant à l'intérieur du cylindre une pression de six à sept atmosphères, jusqu'à ce que l'absorption ci-dessous indiquée fût complète.

La section du tuyau d'entrée de la créosote dans le cylindre et les dimensions des pompes foulantes étaient déterminées de manière à assurer le remplissage du cylindre en moins de quinze minutes.

Les pompes foulantes ainsi que la machine pneumatique étaient activées par une machine à vapeur.

L'imprégnation se faisait à raison de 160 litres par mètre cube de hêtre ou de sapin, et de 80 litres pour le chêne.

L'absorption était constatée par le flotteur, qui devait accuser dans le réservoir une diminution de liquide (supposé ramené à la température du point de départ) correspondant à autant de fois 160 litres (le tout augmenté de 12 p. c.), qu'il y avait dans le cylindre de mètres cubes de hêtre ou de sapin ; ou autant de fois 80 litres (plus 12 p. c.) pour le chêne.

Quand la créosote brute est injectée dans le bois, elle se coagule avec l'albumine et empêche ainsi la décomposition. De leur côté, les huiles bitumineuses entrent dans les tuyaux capillaires, les remplissent, et ôtent à l'air comme à l'eau l'accès des fibres ligneuses. Ces huiles bitumineuses étant inattaquables à l'air et insolubles dans l'eau, la durée est indéfinie. Elles ont si peu à craindre des influences atmosphériques que, dans son rapport sur le créosotage des bois (1), M. *Clift* rapporte avoir vu des tuyaux en fer battu qui, après avoir été enduits de créosote brute et enfouis vingt ans à un pied sous terre, avaient encore l'apparence de conservation et l'odeur particulière primitives.

Outre ces avantages, le créosotage procure aux bois une défense complète contre les attaques du taret (teredo). Depuis 1838, des observations nombreuses ont été faites en Angleterre, et ont confirmé pleinement cet excellent résultat. L'expérience la plus concluante a été faite au port de *Lowestoft*, sur les piles des embarcadères. Le surintendant des travaux, M. *Makinson*, a constaté dans son rapport que les 1,600 pièces créosotées des débarcadères étaient, après trois ans, complétement exemptes des attaques du teredo et de la limnoria ; tandis que, pas une seule pièce non créosotée n'était restée intacte, et que certaines piles étaient même rongées presque en entier.

Pour le procédé de *J. Bethell*, le bois tendre, qui d'ordinaire se pourrit très-vite, devient au contraire préférable par sa faculté d'absorber la créosote en plus grande quantité que le bois dur. De là une économie notable dans les constructions ; ainsi, le sapin d'Écosse pré-

(1) Compte-rendu des délibérations de l'institution des ingénieurs-mécaniciens, au Meeting général de Birmingham, le 22 octobre 1851.

paré à la créosote ne coûterait pas plus que le sapin d'Amérique non injecté, et se conserverait indéfiniment, tandis que le second ne durerait que dix à douze ans dans les circonstances les plus favorables.

Le chêne n'absorbe que la moitié de la créosote dont s'imprègne le sapin de Memel.

Le sapin commun créosoté a le double de durée du bois très-dur créosoté, à cause de sa puissance d'absorption.

Le hêtre est le bois le plus favorable parce qu'il est plein de petits pores ; il prend aussi une couleur plus uniforme pendant l'opération. Mais pour obtenir de bons résultats, il faut le préparer lorsqu'il est récemment abattu, ce bois perdant beaucoup de sa résistance par les influences atmosphériques.

Le bois en longues pièces exige plus de temps pour un même cube. Ce fait résulte de ce que la créosote entre par les deux extrémités, d'où elle pénètre, par la pression, dans toute la longueur des tuyaux capillaires.

*Mailletage* — Depuis longtemps les Hollandais ont employé contre les tarets le mailletage en clous de fer ou de cuivre ayant de 2 à 3 centimètres de diamètre à la tête ; le peu de vides qui existent à l'origine est bientôt caché par une couche générale d'oxyde. Dans les parages vaseux, cette couche se recouvre de limon ; de sorte qu'après plusieurs années, la surface est enduite d'une croûte de quelques millimètres d'épaisseur, dans laquelle la tête des clous a disparu. Sa dureté et peut-être la présence de l'oxyde suffisent parfois pour arrêter les vers.

Dans les angles rentrants des charpentes importantes, telles que les portes et buscs d'écluses, où l'on a besoin d'un contact hermétique, l'on emploie de petits clous très-rapprochés.

Le mailletage se prête facilement à toute espèce de charpente ; il est de longue durée, et peut même être employé sous la vase afin de garantir les pilots. Mais il coûte cher lorsque les clous se touchent ; en outre, il n'est pas un obstacle absolu contre les vers.

L'emploi des clous en cuivre produit un sel plus vénéneux ; mais il est encore plus coûteux que le précédent. Les Anglais en font cependant usage, et rendent le système plus jointif en donnant aux clous des têtes carrées de 12 millimètres de côté.

*Doublage en cuivre ou en zinc.* — Le doublage en cuivre serait

très-bon, s'il s'appliquait plus facilement aux rentrants et si le prix en était moins élevé.

Le doublage en zinc n'est pas de longue durée. Les clous de zinc étant mous ne se fixent pas aisément. Si l'on emploie des clous en fer, il arrive que le zinc se corrode sous la tête, par l'action électrique, et bientôt le doublage n'est plus retenu.

*Enduits et ciments.* — Les enduits sont généralement difficiles à exécuter, et leur durée n'est pas suffisante. Ils ne tiennent qu'imparfaitement sur les bois, ceux-ci étant toujours plus ou moins humides. L'enduit en céruse et vert-de-gris a été employé avec un certain succès, spécialement en Hollande.

Les mêmes observations peuvent s'appliquer aux ciments, qui se fixent, comme le plâtre, au moyen de clous. De plus, ils ne peuvent être employés pour les pilots : ils en seraient détachés par le battage.

# CHAPITRE V.

## MATÉRIAUX POUR FASCINAGES.

---

### Bois.

Les matériaux employés à la confection des ouvrages en fascinage sont : les fascines, saucissons, piquets, harts, clayons, gaules, roseaux, pierres, la paille, la terre glaise, etc.

*Fascines.* — Les fascines sont composées de menues branches formant faisceau, et liées au moyen de gaules appelées harts. Les fascines militaires diffèrent de celles du commerce en ce que, dans les premières, les gros bouts des branches sont placés également à chaque extrémité et donnent ainsi un diamètre régulier, tandis que, dans les secondes, ils sont tous disposés dans le même sens, de sorte que les fascines vont en s'effilant à partir de la tête.

Il existe en Belgique, dans le commerce, plusieurs espèces de fascines.

La première, dite *dykrys* ou grande *fascine de Hollande,* est formée de branches d'aune ou de saule d'eau de trois à quatre ans, bien effilées et portant leur menu bois. Elle est liée par deux ou trois harts. Sa longueur varie de $3^{m}00$ à $3^{m}50$, et son pourtour de $0^{m}40$ à $0^{m}50$; la première hart est placée à $0^{m}20$ du gros bout, et la deuxième à $0^{m}60$ de la première.

Cette fascine s'emploie spécialement à la confection des saucissons à cause de la flexibilité de ses branches.

La *fascine de Gueldre* est une fascine de Hollande un peu plus forte que la précédente; on ne l'emploie guère en Belgique. Il en est de

même de la *fascine de Brabant*, que l'on confectionne près d'Anvers et dans le Brabant septentrional : mais celle-ci a des dimensions moindres que les deux autres ; sa longueur varie de $1^m70$ à $1^m80$ et son pourtour moyen est de $0^m35$ ; elle est liée par deux harts. Elle se compose de branches très-minces de chêne, frêne, noisetier ou bouleau, et d'une seule forte branche qui ne peut dépasser la première hart de plus de $0^m20$ ; l'on admet un quart de saule ou d'aune pour remplissage. Sa forme est aplatie.

La deuxième espèce de fascines du commerce a les mêmes dimensions que celle de Brabant, et porte le nom de *fascine d'Ostende* ou *de Blankenberghe*, ou encore *bestekrys*. Elle a moyennement $1^m10$ de longueur, et elle est munie de deux grosses branches destinées à la maintenir dans sa forme aplatie.

La troisième espèce, dite de *Moerbeek*, se distingue des précédentes par la qualité supérieure de son bois ; elle se compose presque exclusivement de chêne, auquel on joint le frêne, le bouleau et le noisetier. Cette fascine contient une forte branche de $1^m20$ de longueur et $0^m08$ de pourtour moyen. Elle est liée par deux harts placées à $0^m40$ et à $1^m00$ du gros bout ; son périmètre est de $0^m35$ à $0^m40$.

*Saucissons*. — Les saucissons ne sont que de grandes fascines faites au moyen de fascines ordinaires déliées, de menues branches ou de branches choisies appelées *gaules*, et liées de $0^m30$ en $0^m30$ par de solides verges ou harts.

Il n'existe pas de saucissons dans le commerce ; on débite pour leur construction des bottes de gaules dites *latten*. La longueur et le diamètre des saucissons varient suivant l'usage auquel on les destine. Ainsi que nous le verrons, ils sont employés spécialement dans la confection des plates-formes, des fascinages en barbe, etc. Le saule, par sa flexibilité, convient parfaitement à la confection des saucissons, lorsqu'ils sont exposés à devoir suivre les ondulations qui proviennent de mouvements brusques du terrain ou d'érosions. Le chêne, l'aune, le frêne, le bouleau et le noisetier sont des bois moins flexibles et plus difficiles à mettre en œuvre ; mais ils l'emportent en durée et en solidité L'on n'emploie les gaules à la confection des saucissons que pour les cas où ceux-ci ne sont pas exposés à des mouvements d'ondulation du terrain ; par exemple, pour la confection de grillages

sur un sol plat, pour plates-formes à couler sous lest, ou pour arrêter les éboulements au pied des talus.

*Piquets.* — Les piquets doivent être formés de branches de souches, être bien droits et avoir la tête coupée carrément avec un chanfrein qui l'empêche d'éclater. Leur essence varie suivant le but et les localités ; les meilleurs sont en chêne. L'épaisseur, mesurée à $0^m30$ de la pointe, doit être environ 1/12 de la longueur. On les recèpe de $0^m05$ à $0^m07$ après enfoncement.

Les *piquets ordinaires* ont une longueur variable de $1^m10$ à $1^m50$. Ils se débitent par bottes dans le commerce; chaque botte contient dix piquets.

Les piquets dits *slieten* ont des dimensions plus fortes que les précédents; leur longueur est de $2^m00$ à $2^m20$. Il n'y en a que cinq à la botte.

On appelle *piquet chevillé* un fort piquet ordinaire traversé à $0^m06$ ou $0^m07$ de la tête par une cheville en chêne de $0^m12$ à $0^m15$ de longueur sur $0^m02$ d'équarrissage. Lorsque le piquet chevillé atteint $1^m80$ à $2^m00$ de longueur, on le désigne sous le nom de *sliet chevillé.*

*Harts.* — Ce sont des branches minces qui doivent allier une grande flexibilité à une certaine résistance à la torsion. La meilleure essence est le saule d'eau ; le chêne et le frêne sont aussi fréquemment employés. Il est bon, avant d'employer les harts, de les tenir dans l'eau pendant quelques jours, afin d'augmenter leur flexibilité.

On distingue dans le commerce deux espèces de harts, suivant leurs dimensions.

La première sorte, dite *kruysband,* se compose de branches de $2^m00$ de longueur et de $0^m02$ à $0^m03$ de pourtour à $0^m30$ du gros bout. On la vend par bottes de cinq cents brins.

La deuxième espèce, appelée *knypband,* n'a que $1^m30$ de longueur et $0^m015$ à $0^m02$ de pourtour. La botte contient mille brins.

*Clayons.* — Les clayons sont des branches de souches, ayant des dimensions plus fortes que les harts, et, par suite, douées d'une moindre flexibilité. Ils doivent être droits, solides et assez souples. L'on emploie de préférence le chêne, puis le saule, le frêne, le noisetier et le bouleau. Chaque botte contient vingt-cinq clayons ou brins.

Parmi les espèces de clayons du pays, on distingue ceux du *Bra-*

*bant,* qui sont généralement en chêne, et qui ont 3m00 à 3m50 de longueur sur 0m07 à 0m08 de pourtour à 0m30 de la tête. Les clayons de Hollande, ou *haringband,* ne s'emploient que rarement, et pour les ouvrages auxquels on veut donner une certaine apparence; ces clayons sont en bois de saule d'eau; leur longueur n'est que de 2m20; ils sont plus unis, plus réguliers en épaisseur, mais leur emploi est plus coûteux.

*Gaules.* — Ce sont des clayons non choisis, de toute espèce d'essence et de très-fortes dimensions. Ils ont environ 0m09 de pourtour à 0m50 de la tête, et leur longueur varie de 4m00 à 4m50. Il y en a vingt dans une botte.

**Matériaux divers.**

*Roseaux.* — Les roseaux s'emploient dans la confection des faux-radiers, des revêtements, des paillassons, des plates-formes, etc.

Les *roseaux secs* sont utilisés pour les paillassons et les revêtements de talus. Chaque botte est liée par une hart à 0m30 du gros bout; son pourtour y est de 1m00, et sa longueur est de 2m50.

Les *roseaux verts* s'emploient surtout pour le remplissage des plates-formes, et pour servir de base à certains travaux hydrauliques, où ils sont destinés à prévenir le siphonnement des eaux. Ils doivent être flexibles et exempts de moisissure. Le pourtour de la botte est de 0m60.

*Pierres.* — L'on emploie, pour lester les fascinages, des pierres de toute espèce et de toute forme, ainsi que des briques de rebut ou des débris de vieille maçonnerie dégagée au préalable de son mortier. Il faut cependant faire une exception pour celles qui sont destinées à servir de lest aux revêtements; elles doivent être plus ou moins parallèlépipédiques, et avoir en moyenne 0m50 de longueur, 0m40 de largeur et 0m15 d'épaisseur. L'on emploie spécialement pour ces dernières les *pierres de Tournay* et celles *de Vilvorde.* Ces pierres sont moins coûteuses en blocs réguliers que les calcaires ou les grès d'Arquennes, de Lessines, de Velaines, etc., et présentent en outre le grand avantage de ne pas absorber l'humidité et de résister à la gelée ainsi qu'aux alternatives de sécheresse et d'humidité.

*Paille.* — La paille est utilisée pour la confection des paillassons destinés à revêtir le talus des digues qui sont exposées à un fort cla-

potage. On fait usage de la paille de blé, ou à défaut de celle-ci, de celles d'avoine et d'orge ; celle de seigle, qui résiste le mieux à la pourriture, est réservée d'ordinaire pour les crampons ou attaches du paillasson, vu sa rareté dans les provinces limitrophes de la mer ou de l'Escaut. Les bottes ont $1^m00$ de pourtour au lien, et $1^m60$ de longueur moyenne.

*Terre glaise ou de schorre.* — On désigne sous le nom de *schorres* les parties du lit d'un fleuve qui s'étendent contre les rives, et qui sont alternativement sous l'eau et à découvert par l'effet journalier des marées. L'alluvion dont se compose la couche supérieure de ces terrains constitue une espèce de terre argileuse appelée *terre de schorre.* Elle sert spécialement à la construction des digues, ou plutôt du revêtement de la partie exposée au choc des vagues. On l'extrait en parallèlépipèdes de $0^m20$ à $0^m25$ de côté ; sa couleur est d'un gris bleuâtre ; elle doit être compacte, non vaseuse ou sablonneuse, et dégagée de racines de roseaux qui pourraient produire des infiltrations ; son poids spécifique doit dépasser celui de l'eau.

L'on emploie aussi aux revêtements les gazons qui croissent sur les schorres ; on les extrait en prismes de $0^m25$ de côté en carré à la base, et $0^m10$ d'épaisseur.

# CHAPITRE VI.

## REVÊTEMENTS DES TALUS.

Les talus des terrassements soumis à l'action des marées sont exposés à subir des dégradations, des affouillements plus ou moins rapides et considérables suivant la puissance des vagues, l'inclinaison des rives et la nature du terrain. Ces érosions sont dues aux chocs et aux frottements des eaux et des glaçons, à l'action du dégel, aux alternatives de sécheresse et d'humidité.

Dès lors, il devient souvent indispensable de protéger les talus des digues ou des ouvrages, au moyen d'un revêtement dont le genre de construction varie avec le degré de résistance qu'il doit offrir.

### Revêtements en paillassonnages.

Le revêtement en paillassonnage s'emploie lorsqu'il s'agit de préserver les talus du clapotage des eaux. Lorsqu'il couvre ainsi tout un talus, on le désigne sous le nom de *paillasson d'hiver*.

Le paillassonnage, appelé *paillasson d'été*, est moins résistant ; il est utilisé pour conserver les digues et autres ouvrages en construction, pour servir de lit aux revêtements en pierres ou en fascinages, etc.

Le revêtement en paillassonnage s'exécute sur une couche de terre argileuse ou de terre de schorre, bien dressée au préalable et couverte d'un lit de paille, dont la première levée présente les gros bouts vers la crête du talus, et est perpendiculaire à la direction de celle-ci. Les autres couches ou levées ont le gros bout vers le bas. La deuxième levée couvre entièrement la première ; les autres se placent en retraite

de $0^m25$, et l'on donne à la dernière un surcroît d'épaisseur. Le paillasson est ensuite fixé au terrain par des rangées d'attaches ou de doubles crampons en paille de seigle, espacées entre elles de $0^m20$. Chaque crampon se compose d'un cylindre en paille de $0^m03$ de diamètre, dont on enfonce les extrémités de $0^m12$ à $0^m15$ dans le terrain, après les avoir d'abord repliées et tordues. Les crampons d'une rangée sont jointifs par leur fiche, et embrassent dans leur tête une longueur de $0^m08$.

On donne aux paillassons une épaisseur moyenne de $0^m12$, qui se réduit à $0^m03$ environ après le cramponnage. On augmente quelquefois ce revêtement en le recouvrant d'un tapis de roseaux construit aussi par levées, mais dont les retraites ont $0^m70$ à $0^m80$.

Il est bon de mettre à l'eau, pendant vingt-quatre heures, la paille destinée à la confection des attaches.

### Revêtements en fascinages.

*Tunage.* — Il existe différentes espèces de revêtements en fascinages, selon la résistance qui est jugée nécessaire et le but que l'on veut atteindre. Comme ils comprennent tous, dans leur construction, un genre de travail appelé *tunage*, nous allons d'abord décrire ce dernier.

Un tunage se compose de plusieurs rangées parallèles de piquets, espacées entre elles d'ordinaire de $0^m40$ d'axe en axe, et que l'on entrelace d'un certain nombre de torons formés chacun de 3, 4, 5, 6 et même 7 clayons. Ce sont des claies de fortes dimensions. Chaque rangée s'appelle *tune;* elle est fixée au revêtement en fascinages par les piquets, qui le dépassent suivant l'espèce de revêtement adopté.

Pour construire une tune, on commence par planter les piquets, en les alignant au cordeau, et en les enfonçant provisoirement de quelques décimètres. On procède ensuite au clayonnage. Chaque fascineur commence en un point différent; il part successivement de chaque piquet avec un toron composé d'un nombre variable de brins, le passe alternativement entre les piquets, en croisant en outre les clayons dans le sens vertical. Le premier piquet a chaque fois un toron double. Ce travail étant fait sur 8 ou 10 mètres de longueur, d'autres fasci-

neurs s'occupent à dresser ce fascinage, en employant le cordeau, le maillet et le levier : à cet effet, ils achèvent l'enfoncement définitif des piquets, et font descendre le clayonnage jusqu'à la hauteur déterminée. On recèpe alors les piquets, s'il y a lieu.

Le tunage *ordinaire* a $0^m15$ de hauteur ; les torons ou tresses se composent de 4 clayons, dont on a soin de placer le plus fort à la partie supérieure de la tresse ; la tête des piquets dépasse le tunage de $0^m05$ à $0^m06$.

L'on emploie un quart de piquets chevillés, lorsque le tunage a pour but de fixer au terrain un fascinage exposé à être soulevé par les eaux.

Lorsque des tunages sont construits au pied de talus de remblais, pour empêcher ceux-ci de glisser en avant, on les désigne sous le nom de *kiel tuin*, ou encore tunages *forts* à cause de la solidité de leur construction.

*Revêtement ordinaire.* — On commence par établir au pied du talus un fort tunage, ou *kiel tuin*, à torons de 4 brins, et ayant $0^m20$ de hauteur. Ensuite, après avoir couvert le talus d'une couche de terre de schorre bien dressée, on construit un premier revêtement en roseaux secs, en partant de la crête. Les petits bouts de la première levée sont dirigés vers le bas ; l'inverse a lieu pour toutes les autres levées. La deuxième levée se place sur la première de façon à la recouvrir complétement ; les levées suivantes sont disposées en retraites de $0^m75$. Le but de ce premier lit est d'empêcher le délavement des terres à travers le fascinage ; son épaisseur est d'environ $0^m05$.

On procède alors à la construction du revêtement proprement dit. Le long du *kiel tuin* et de la crête du talus, on dispose un lit de $0^m30$ de largeur, composé de fascines qui se recouvrent les unes les autres du 1/3 de leur largeur, et en retraites de $0^m50$ dans le sens longitudinal. Le reste se construit comme précédemment, par levées successives, perpendiculaires à la crête. La première levée touche, par ses gros bouts, la rangée longitudinale de la partie supérieure ; la deuxième levée couvre la première et la rangée longitudinale ; la troisième cache en partie les deux précédentes, ses gros bouts, comme dans les levées suivantes, étant dirigés vers le bas. La dernière levée s'arrête contre le *kiel tuin*. Dans toutes ces levées, les fascines se recouvrent les unes les autres du 1/3 de leur grosseur, et les retraites des levées successives

sont de $0^m50$. L'épaisseur moyenne du lit de fascines est de $0^m10$.

Le revêtement est fixé au terrain par une série de tunes parallèles à la crête ou au *kiel tuin*. Les tunes supérieure et inférieure se placent à la première hart des deuxième et dernière levées; les autres sont espacées d'environ $0^m50$. Les torons du clayonnage sont à 4 clayons, et l'on emploie d'ordinaire 1/4 de forts piquets à tête chevillée.

*Revêtement à tunes serrées.* — Ce genre de revêtement est beaucoup plus solide que le précédent; aussi, sa résistance à l'action des vagues est-elle considérable.

Il se compose d'abord d'un double paillassonnage, dont la première couche, en paille de blé, a $0^m01$ d'épaisseur; la seconde, de $0^m02$, est en roseaux secs. Ces deux couches sont posées par levées sur argile dressée, et fixées entre elles et au terrain par des cramponnages. Le paillasson étant alors recouvert d'une couche de $0^m05$ de roseaux secs; on procède ensuite à la confection du revêtement en fascinage. Celui-ci diffère du revêtement ordinaire, en ce que les retraites des levées n'ont que $0^m40$, et que les fascines se recouvrent les unes les autres de la moitié de leur épaisseur, ce qui porte à $0^m15$ l'épaisseur du lit.

Le double paillassonnage et le revêtement sont fixés au talus par un tunage fort, de cinq ou six brins par tresse, et espacés d'environ $0^m15$. Un quart des piquets est encore chevillé; le *kiel tuin* du pied doit être enterré, et formé de torons à six ou sept brins entrelacés dans de forts piquets ou *slieten*.

*Revêtement à tunes lesté.* Dans les parages infestés par les *tarets*, on remarque que les fascinages sont promptement rongés depuis leur pied jusqu'au niveau des basses marées; souvent, leur existence ne dépasse guère une année, tandis que la paille et les roseaux demeurent intacts.

L'on évite cet inconvénient d'une manière assez satisfaisante en employant, pour la partie vulnérable, un revêtement à tunes lesté de pierres. Lorsqu'on veut obtenir une résistance plus grande à l'action des vagues que celle du revêtement ordinaire, l'on emploie encore le revêtement à tunes lesté, mais sur toute la surface du talus exposé.

Les lits et les tunes de ce revêtement se construisent comme dans celui à tunes serrées; l'écartement des tunes seul est différent; celui-ci est de $0^m,60$ si l'on emploie comme lest des pierres de Tournai, et

de 0m,40 pour celles de Vilvorde. Dans le premier cas, les pierres doivent se placer à plat, suivant leur lit de carrière, et laisser peu de vides entre elles ; les pierres de Vilvorde, au contraire, se posent de champ, et comme elles sont moins façonnées les vides se remplissent au moyen d'éclats ou de briquaillons.

Tous les ouvrages précédents se construisent à sec, ou au moins au dessus du niveau des basses eaux ordinaires. Lorsqu'il s'agit d'exécuter, sans épuisement préalable, un revêtement en fascinage destiné à défendre ou à restaurer une rive en dessous du niveau des marées basses, l'on a recours aux ouvrages désignés, suivant les contrées, sous les noms de *rys-bermes* et de *fascinages en barbe*.

*Rys-berme*. La rys-berme, on *baardwerk* en hollandais, est formée d'un massif, ou d'un certain nombre de massifs, dits *baarden*, composés eux-mêmes de plusieurs lits de grandes fascines, en retraite les uns sur les autres et reliés par des saucissons. Cet ouvrage s'exécute souvent en réparation.

Sur toute la longueur de la surface à revêtir, et même sur quelques mètres au delà, en amont, on modifie, si la largeur du franc-bord le permet, l'inclinaison trop roide des parties corrodées, en creusant le talus en pente douce jusqu'au bord de l'eau, sur une largeur de 6 à 10 mètres, selon la force des vagues, la profondeur à revêtir et la cohésion des terres. Si le franc-bord est insuffisant, on comble les excavations au moyen de terre de schorre de façon à détruire la roideur du talus ; mais ce procédé offre moins de garanties que le précédent.

Cette opération préalable se fait pendant le reflux, lorsque le terrain de rive est découvert. C'est aussi pendant la marée basse que l'on commence la construction du fascinage (fig. 9).

A cet effet, l'on établit sur la rive modifiée, et sur la longueur à revêtir, une première levée de fascines, se recouvrant de la moitié de leur épaisseur et les gros bouts vers la digue ; ce lit est fixé au terrain par deux rangées de piquets, espacés de 0m30 sur chaque fascine et placés près des harts. On place alors, au milieu de la partie flottante, et parallèlement à la rive, une rangée de deux ou trois fascines se recouvrant des 3/4 dans leur longueur et leur épaisseur, et qui ont pour objet de relever au-dessus de l'eau les petits bouts des fascines de la levée suivante. On construit ainsi un certain nombre de levées,

suivant la durée des eaux étales, en les posant en retraite de 0m50, et en les garnissant chacune d'une rangée de deux ou trois fascines destinée à soulever les extrémités de la levée ultérieure. Ce travail terminé, on place contre les gros bouts de chaque levée une rangée d'une seule fascine; puis, on couvre l'ensemble d'un double lit de fascines jointives, le premier perpendiculaire, le second paralèlle à la digue (fig. 10). Les piquets de ces lits, ainsi que ceux des levées, sont espacés entre eux de 0m30 dans tous les sens. Parfois, on remplace le double lit de fascines par deux couches de branchages, placées diagonalement sur la partie flottante, en commençant le travail du côté de l'eau.

Lorsqu'on prévoit qu'il sera impossible de construire le massif sur toute la longueur pendant une marée, il est prudent de l'établir par parties successives, surtout lorsque les vagues sont puissantes.

Dès que le flux se fait sentir, il faut se hâter de relier toutes les couches du revêtement par un grillage en saucissons, de 3m80 à 4m00 de longueur, dont les files sont espacées d'environ 1m00, et reliées entre elles par des piquets chevillés ; les saucissons sont en outre piquetés de 0m30 en 0m30, tant sur la partie flottante que sur celle qui est fixée à la digue, et couronnés par un tunage entre les piquets que l'on fait un peu incliner vers la rive, afin de mieux retenir les matières pesantes, gravier, décombres ou pierres qui vont servir de lest pour l'échouage. Ce chargement doit se faire avec précaution, de façon à faire descendre le massif graduellement contre le talus affouillé ; on veillera à ce que les parties les plus rapprochées du bord touchent les premières, sinon le revêtement formerait une courbe convexe vers l'eau, et laisserait sous lui un vide très-nuisible.

S'il a été impossible, pendant la durée des eaux étales, de pousser assez loin la construction de la partie flottante pour atteindre, après l'échouage, le pied du talus attaqué, on coule néanmoins la partie construite, et on achève l'ouvrage pendant les marées basses suivantes, en commençant toujours le plus possible aux extrémités noyées des couches abandonnées précédemment. On donne au revêtement une étendue telle, qu'il se prolonge un peu sur le plafond, et on charge fortement cette partie.

Le mode de construction des rys-bermes diffère suivant les localités;

il varie aussi plus ou moins d'après la hauteur des marées et la violence des vagues. Celui que nous venons de détailler s'emploie en Hollande, spécialement dans la Gueldre, et l'on en a fait grand usage dans les travaux d'endiguement des rives de l'Escaut, après les inondations tendues en 1830 par les Hollandais.

Le genre de rysberme désigné sous le nom de *baardwerk* se construit lorsqu'on veut donner une grande épaisseur au revêtement ; par exemple, en des endroits où les affouillements sont considérables, et à une assez grande profondeur sous l'eau.

Après avoir construit comme précédemment les levées de fascines, les rangées parallèles à la rive et le double lit de fascines jointives ou de branchages, on relie toutes ces parties par des files parallèles de saucissons, placées diagonalement aux levées, aux rangées et au double lit de fascines. Ces saucissons se relient au massif par des piquets qui le traversent, et qui sont espacés de $0^m60$ sur la partie flottante et de $1^m80$ sur le sol. L'écartement des files est de $1^m90$.

Sur la première tranche, ou *baard*, ainsi construite, on fixe une deuxième tranche travaillée de même, et attachée à la précédente comme celle-ci l'a été à la rive ; ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on ait atteint une épaisseur suffisante, ou que l'on craigne de voir les assemblages céder à la violence des vagues. Ce massif est alors recouvert d'une couche de branchages, s'étendant sur la partie flottante seulement, et ayant environ $0^m30$ d'épaisseur ; il est ensuite relié à la rive par des rangées de saucissons, espacées de $0^m80$ et disposées perpendiculairement à la direction de la digue. Les saucissons doivent être solidement fixés au massif et au sol ; à cet effet, ils sont piquetés de $0^m30$ en $0^m30$.

Parallèlement au courant, et à l'extrémité avancée de la partie flottante, l'on établit transversalement aux rangées précédentes, trois nouveaux cours de saucissons, dont deux jointifs et le troisième en couronnement ; ils sont piquetés de la même façon, et surmontés d'un tunage. Enfin, l'on couvre tout le massif d'une série de rangées en saucissons simples, placées parallèlement au triple cours précédent, garnies de tunes et espacées de $2^m00$ à $2^m50$ suivant la pente du talus de rive. Il reste à lester l'ensemble et à le faire descendre graduellement contre la partie affouillée.

Au lieu de construire ainsi entièrement le *baardwerk* au-dessus de l'eau, l'on coule parfois jusqu'au niveau de celle-ci chaque tranche successsive, ou *baard,* après l'avoir convenablement lestée. A cet effet, l'on relie, dans chacune d'elles, par des saucissons recroisés, le massif de fascines avec le lit de branchages correspondant, et l'on remplit de matières pesantes les cases ainsi formées.

Lorsque le choc des vagues n'est pas considérable, l'on peut construire la rysberme d'une façon beaucoup plus simple.

L'on commence, comme précédemment, par établir un certain nombre de levées de fascines, mais dont les retraites n'ont plus que $0^{m}30$. L'on supprime complétement les rangées parallèles à la rive, et l'on se contente d'obtenir l'épaisseur nécessaire au moyen d'une couche de branchages recouverte d'une assise de fascines. Le massif est recouvert alors du double grillage en saucissons et des tunages, comme dans les rysbermes décrites.

Ce revêtement est fréquemment employé en Hollande.

*Fascinage en barbe.* — L'on désigne parfois sous ce nom le premier genre de rysberme que nous avons décrit. Cependant le revêtement ou fascinage en barbe se compose spécialement d'un certain nombre de massifs en fascinages, dont chacun est formé d'un bâti ou grillage inférieur en saucissons, relié à la rive et supportant six à huit lits de fascines (fig. 11).

Après avoir entaillé dans le talus, au-dessus des marées basses, des tranchées distantes de $2^{m}00$ d'axe en axe, et ayant de 4 à 5 mètres de profondeur depuis le bord de l'eau, l'on commence la construction du grillage qui est formé de très-longs saucissons recroisés. A cet effet, l'on pose d'abord, dans l'axe des tranchées, des cours perpendiculaires à la rive que l'on fixe solidement au terrain au moyen de forts piquets. On les recroise ensuite par d'autres rangées parallèles aux rives et espacées inégalement de façon à avoir entre elles $0^{m}50$ d'intervalle du côté de l'eau et $0^{m}80$ à $1^{m}00$ près du talus Tout le système est fortement lié avec des harts, ou *kruysbanden,* en osier ou en chêne.

Sur ce grillage flottant l'on établit alors un massif de six à huit lits de fascines recroisées, et tels que toutes les fascines extrêmes présentent leur queue du côté de l'eau. Les lits sont reliés entre eux par des piquets; les têtes de ces derniers, dans la couche supérieure seule-

ment, reçoivent un clayonnage ou tunage, destiné à maintenir les pierres ou graviers qui servent à lester le premier massif jusqu'à ce qu'il s'enfonce et vienne en s'inclinant recouvrir le talus affouillé.

L'on établit ensuite des massifs semblables au précédent, mais en retraite les uns sur les autres jusqu'à ce que le niveau supérieur du revêtement ait atteint celui de la marée basse.

Les constructions supérieures, soit fascinages de soutènement soit *pakbermes*, s'établissent alors à sec dans l'intervalle des marées.

### Fascinages de soutènement.

Les fascinages de soutènement comprennent deux espèces d'ouvrages : le *pakwerk*, ou soutènement proprement dit, et la *pakberme*, que l'on appelle souvent fascinage de berme.

*Pakwerk*. — Ce fascinage s'emploie dans diverses circonstances : il relie aux rives des ouvrages exécutés au-dessous du niveau des marées basses ; il soutient les remblais des digues ; on l'emploie aussi comme revêtement aux endroits fortement exposés au choc des vagues ; enfin, il sert à former les têtes ou ailes d'écluses, les musoirs, les quais, etc.

Il se compose de couches alternatives de fascines et de tunages, en retraite de 0m05 à 0,10 les unes sur les autres, et dont la première est établie sur une plate-forme déblayée carrément dans le talus de la digue ou de la rive. Les tunes sont remplies de terre argileuse ou de schorre. L'épaisseur du revêtement varie suivant les circonstances et les localités, surtout pour les parties basses dont la construction est parfois contrariée par les marées ; cependant, l'expérience a démontré qu'une largeur de 3m00 ou de trois petites fascines est suffisante dans les plus mauvaises circonstances. L'inclinaison est aussi variable ; lorsque la hauteur n'est pas forte, on dispose le revêtement avec le moins de talus possible, afin de provoquer un tassement qui ait lieu sur le fascinage lui-même ; dans tous les cas, l'on ne donne jamais plus de 0m50 de base pour 1m00 de hauteur.

L'on emploie d'ordinaire pour ce travail des fascines de grande espèce, de façon à n'avoir par couche qu'une seule levée pour toute l'épaisseur. Lorsqu'on se sert de fascines plus petites, on les dispose

comme il est indiqué à la fig. 12. Si une couche est formée de deux levées, elle est surmontée de trois tunes; elle a quatre tunes lorsque l'épaisseur est de trois levées. La première tune est placée dans la ligne d'inclinaison du talus et ses piquets traversent les gros bouts de la première levée contre la première hart; la tune suivante fixe de même à la première hart et par leurs gros bouts les fascines de la deuxième levée; la troisième tune réunit les troisième et quatrième levées, et enfin, la dernière fixe l'extrémité intérieure de la couche.

Chaque couche de fascines a $0^m10$ d'épaisseur; celle de terre a environ $0^m15$ et arrose le tunage.

Lorsque le *pakwerk* est employé en réparation à un talus, on lui donne rarement plus de $1^m50$ d'épaisseur, afin de limiter le déblai à exécuter dans le corps de la digue, dont les terres affermies offrent toujours plus de solidité que celles d'un nouveau remblai.

Dans les cas où il doit servir de soutènement aux parties situées entre les hautes et les basses marées, le *pakwerk* est surmonté de tunes formant le surplus de la hauteur de la digue; mais quand il forme tête d'écluse, musoir, quai, etc., il est ordinairement élevé à la hauteur des rives, et recouvert à sa partie supérieure d'une couche de fascines fixée par des tunages régulièrement établis, et remplis de terres, de décombres, ou de pierres, soit de Vilvorde soit de Tournai.

Le *pakwerk* suffit lorsque la partie inférieure du talus de rive située au-dessous des marées basses est assez résistante pour servir de soutien au fascinage, et pour résister aux affouillements. Dans le cas contraire, il est indispensable de construire d'abord un revêtement inférieur, c'est-à-dire une *rysberme* ou un fascinage en barbe.

*Pakberme.* — La *pakberme* diffère peu du revêtement précédent. Pour la construire, on commence par déblayer carrément l'emplacement du fascinage jusqu'au niveau de la marée basse, en réservant un faible talus de l'arrière à l'avant, pour empêcher que l'ouvrage ne soit affouillé par dessous. L'on enfonce ensuite, au pied du talus extérieur, une série de piquets d'environ $1^m50$, espacés de $0^m40$ et dépassant le sol de $0^m30$. On les relie par une tune de $0^m15$ de hauteur, sur laquelle vient s'appuyer la première couche de fascines qui fait saillie de quelques centimètres. A $0^m30$ en arrière du gros bout des fascines, l'on établit une seconde tune pareille à la précédente; et

parallèlement à ces clayonnages, on recroise les fascines, à 0m70 et 1m40 en arrière de la deuxième tune, par des rangs de saucissons de 0m16 de diamètre, fixés au massif au moyen de piquets espacés entre eux de 0m40 à 0m50; ces saucissons servent à relever l'extrémité mince des fascines supérieures. Le tout est arasé alors avec du gravier ou de la terre argileuse, que l'on dispose en talus de 0m10 à 0m12 au mètre, de l'arrière à l'avant, afin de racheter encore la diminution de l'épaisseur des fascines vers la rive. Après avoir damé ces terres avec soin, l'on construit un massif composé de trois fascines d'épaisseur, c'est-à-dire d'environ 0m40, sur lequel on fixe, comme précédemment, une tune et une nouvelle couche de fascines, en conservant une retraite de 0m10 à 0m12 sur la couche inférieure (fig. 12).

L'on continue ainsi jusqu'à la hauteur voulue; puis on couronne le tout au moyen de couches de fascines placées alternativement avec les gros bouts vers le courant ou vers la rive, et fixées par des tunes espacées de 0m60, que l'on arase avec des terres.

### Applications militaires.

Les divers revêtements en fascinage s'emploient, suivant les circonstances, pour garantir les talus en terre des ouvrages militaires exposés à l'influence des marées. Le *pakwerk* et la *pakberme* ont aussi des applications variées.

L'aqueduc du fort Sainte-Marie, dont nous parlerons plus loin, nous offre des applications du *pakwerk*. Ce genre de fascinage y est établi en avant du musoir, de chaque côté de l'avant-radier, dans le but de préserver ces parties des érosions et des affouillements (fig. 52).

Il peut arriver que l'on ait à construire un épaulement devant une digue dont la crête doive former le terre-plein de la batterie ou de l'ouvrage, et qu'il soit dangereux d'entailler la digue pour en extraire les terres nécessaires au parapet. Souvent, il est impossible, par des considérations de rapidité ou autres, de construire l'épaulement au moyen de terres apportées; en outre, l'épaisseur en crête de la digue est généralement insuffisante. Dès lors, il devient indispensable de recourir aux fascinages. L'on commence par consolider le talus extérieur et par élargir la digue par la construction d'une *pakberme*, dont le

talus ait le moins d'inclinaison possible. L'épaulement se construit alors sur cette base, et se compose lui-même d'un *pakwerk* d'une épaisseur variable, suivant les localités et la résistance qu'il doit offrir à la pénétration des projectiles.

### Avantages et inconvénients des fascinages.

Ce qui distingue spécialement les fascinages des autres travaux destinés à défendre les rives, c'est la liaison parfaite, la solidarité extrême de toutes les parties de l'ouvrage. Leur démolition est très-lente; elle exige à la fois l'emploi de la hache, du crochet, et même de la pelle ou de la bêche, si le lest est composé de terre grasse. Contrairement aux revêtements abrupts ou unis, les fascinages ne réfléchissent pas les vagues, mais les divisent et en amortissent la vitesse en s'entourant d'une eau tranquille qui résiste par son inertie. Ils présentent aussi le grand avantage d'une exécution rapide, qui devient possible par la division du travail et par l'emploi de matériaux identiques.

L'inconvénient principal des fascinages consiste dans leur faible durée; là où ils n'ont pas à craindre les attaques des tarets, ils ne résistent que trois à quatre ans au-dessus des marées basses, et six à huit ans sous ce niveau. Cependant ils se conservent plus longtemps lorsqu'ils sont entourés de vase ou de terre argileuse.

Le genre de revêtement à adopter dépend de la qualité des terres employées à la confection de la digue, de l'époque de sa construction, de l'inclinaison de ses talus, de sa position par rapport aux vents régnants, de la violence de ceux-ci et de la hauteur des marées.

Les revêtements à tunes lestées s'emploient lorsque les talus sont affermis et que leur inclinaison est suffisante. Les pierres du lest, résistant davantage aux eaux et aux intempéries, doublent la durée du fascinage. Mais il ne peut être question de l'appliquer à des talus peu inclinés de digues récemment construites et protégées par un faible franc-bord. Exposé à des tassements continuels par la pesanteur de ses terres humides et par la faible inclinaison des talus, ce remblai récent se maintiendrait encore moins, si l'on joignait à cette action celle qui proviendrait du poids des tunages.

**Revêtements en pierres sèches ou perrés.**

Les perrés, ou revêtements en pierres sèches, se construisent au moyen de moellons ou de briques; cependant, ces derniers matériaux sont rarement employés pour les ouvrages exposés au choc des vagues.

*Perrés en moellons.* — Ce sont des revêtements en pierres inégales, dont une des faces est dégauchie, et que l'on pose à plat par assises irrégulières, par lits incertains ou par relevées. Le talus doit être au préalable déblayé et dressé; souvent même l'on établit le revêtement sur une forme en sable ou en pierrailles, destinée à empêcher les tassements inégaux qui gauchiraient la surface extérieure et faciliteraient ainsi les érosions.

Les digues destinées à recevoir un perré de ce genre doivent être formées de terres très-fortes ou avoir subi un tassement de deux à trois ans; pendant cet intervalle, on recouvre provisoirement le talus par un paillassonnage, par des claies, ou par un revêtément ordinaire en fascinage.

Le revêtement en pierres sèches est celui qui résiste le mieux à l'action violente des vagues. Son prix de revient est largement compensé par sa longue durée et par la facilité de son entretien; celui-ci ne coûte guère que l'emploi journalier d'un cantonnier chargé, après chaque marée haute, de remplir avec des éclats de pierres les joints qui pourraient s'être dégarnis.

Les perrés ne sont que de simples chemises destinées à protéger les talus; ils ne peuvent être appelés à servir de soutènement contre la poussée des terres. On les établit généralement entre le niveau de la marée basse et celui des plus hautes marées; d'autres fois on les descend jusqu'au pied du talus. Dans l'un et l'autre cas, il est indispensable de bien assurer leur pied; c'est l'endroit le plus exposé à l'action des vagues. Celles-ci, en effet, y retombent de tout leur poids après avoir déferlé sur le perré, et ces chocs réitérés, joints au clapotement de l'eau, tendraient à déchausser rapidement le revêtement à sa partie inférieure.

Les fondations des perrés varient suivant la nature du terrain, la hauteur et la force des marées. Lorsque le sol est consistant, elles se

composent d'enrochements bétonnés, ou bien de massifs à pierres perdues si l'on doit travailler sous l'eau. Dans les terres légères ou sablonneuses, l'on maintient le pied des fondations par une file de pilots jointifs liernés entre eux, ou par un coffrage formé de pilots et de madriers posés de champ (fig. 13). Il faut avoir soin, dans ce dernier cas, de maintenir toujours la charpente au-dessous du niveau des marées basses.

Dans nos villes maritimes, l'on a adopté le mode de construction suivant pour les perrés des digues de mer, et l'on y emploie de préférence la pierre de Tournai, à cause de son poids qui est supérieur à celui de la pierre de Vilvorde, et pour sa grande résistance à l'usure produite par le frottement des vagues.

Afin de prévenir tout affaissement du perré, l'on commence par en soutenir le pied au moyen d'une charpente en chêne, composée d'une file de pilots de $3^m00$ environ de longueur sur $0^m20$ d'équarrissage, espacés de $1^m25$ d'axe en axe et couronnés par un chapeau de même équarrissage; celui-ci est assemblé avec les pilots par des tenons qui affleurent sa face supérieure. A l'intérieur règne une ventrière en chêne de $0^m07$ d'épaisseur sur $0^m60$ de hauteur, composée de deux madriers, et fixée contre le pilotage par des clous de $0^m15$ à $0^m18$.

Le talus à revêtir est ensuite recouvert d'une couche de $0^m10$ à $0^m12$ de terre argileuse bien égalisée, qui reçoit à son tour un paillasson de première classe, destiné à en empêcher le délavement par les vagues pendant la construction du perré.

Après avoir, au fur et à mesure, façonné à la masse les pierres du revêtement, on les pose selon leur lit de carrière, en losanges et par rangées dont la première, composée des pierres de la plus forte dimension, s'appuie contre la ventrière. Les rangées varient de $0^m20$ à $0^m40$ en largeur et en épaisseur, suivant les dimensions des pierres; celles-ci sont serrées entre elles au moyen de la pince en fer, et les vides ou joints sont remplis par des éclats de pierre, de décombres broyés et de sable.

Le revêtement devra être construit de façon que le parement s'élève de quelques centimètres au-dessus du profil définitif, afin de pouvoir subir un redressement à coups de mouton à bras.

Il reste à soutenir la partie supérieure du perré par une charpente

en chêne, légèrement enterrée, et composée de pieux de 2m00 environ de longueur sur 0m15 d'équarrissage, espacés de 1m25, et réunis par une ventrière de 0m50 sur 0m05, qui règne sur toute la longueur du revêtement.

*Perrés en briques.* — Ce genre de revêtement peut être utilisé lorsqu'il s'agit de préserver les talus des légères dégradations produites par le clapotement des vagues. C'est ainsi qu'appliqués aux talus du chenal du port d'Ostende, ils ont présenté des résultats très satisfaisants.

Après avoir recouvert le talus à revêtir d'une couche de glaise bien damée et égalisée, dans le but d'empêcher le délavement des terres, l'on construit à son pied une charpente de soutènement, en chêne ou en sapin, composée d'un bordage de 0m05 sur 0m35 qui règne sur toute la longueur, et qui est soutenu par une file de pieux espacés de 1m20 et ayant environ 1m50 de longueur sur 0m12 à 0m15 de diamètre. Le revêtement est formé d'une assise de briques de champ sur une assise à plat, posées à sec; dans celle-ci la longueur des briques se trouve dans le sens de l'inclinaison des talus; dans l'autre, la direction est perpendiculaire.

L'on soutient encore la dernière ligne supérieure par un bordage de 0m04 sur 0m20, cloué contre une file de pieux, espacés de 1m25, et ayant 0m10 de diamètre sur environ 1m00 de longueur. Cette charpente se trouve à 0m03 au-dessous de la surface du perré, et est couverte d'une rangée de gazons de schorre de 0m30 de largeur sur 0m10 d'épaisseur, destinée à la garantir de l'action de l'air et à soutenir la partie du talus qui s'élève au-dessus du perré.

Lorsque les terres de la digue sont peu consistantes ou récemment remblayées, il est nécessaire, pour éviter les affaissements, de commencer le perré à une certaine profondeur au-dessous du plafond. D'ordinaire, l'on ne revêt que la partie la plus exposée, depuis le niveau de la marée basse jusqu'à 1m00 plus bas; dans ce cas, le talus, soutenu par une charpente, se construit sur une banquette présentant pour le moins 1m00 de franc-bord.

*Perrés mixtes.* — Le mortier a été rarement employé dans la construction des perrés ou revêtements proprement dits; parfois cependant la maçonnerie avec mortier a été combinée avec un remplissage

établi à sec, soit en pierres soit en briques. L'on a fait une heureuse application de ce genre, en 1858, à Saint-Malo, par la construction d'un revêtement destiné à défendre au Nord, du côté de la pleine mer, la digue connue sous le nom de Sillon, formée de sable fin et déjà fortement attaquée par les vagues et les courants.

On a donné (1) au parement extérieur une forme courbe, afin d'amortir par degrés insensibles les chocs violents des vagues, au lieu de leur opposer un obstacle direct, tel qu'un revêtement plus ou moins vertical. Son profil (fig. 14) est formé d'un arc de parabole prolongé par un arc de cercle qui est lui-même surmonté d'une portion de ligne droite inclinée avec un fruit de 1/5. Le pied du parement se termine horizontalement sur l'axe de l'arc parabolique, et il est défendu par un bordage en palplanches, maintenues par des pilots et enfoncées de 2m70. En cet endroit, le revêtement a un empâtement de 1m20 de profondeur.

L'épaisseur totale du perré est de 0m80. Le parement est construit en moellons smillés, posés en *opus incertum*, avec du mortier hydraulique. Ces moellons ont 0m40 de queue, et leurs joints sont retournés d'équerre au parement sur 0m25 environ de longueur. La couche inférieure, dont l'épaisseur est aussi de 0m40, est formée de pierres sèches. Les vides sont entièrement remplis au moyen de débris et de sable; cette précaution a été prise à la suite d'une observation faite pendant la construction. Au commencement des travaux, quelques joints s'étant fissurés dans une partie du perré construite à l'abri des atteintes de la mer pendant une morte eau et submergée pendant la vive eau suivante, l'on en a conclu que le sable du talus de la digue avait dû se délaver et s'introduire dans la couche en pierres sèches par l'effet de la brusque submersion, et qu'un petit vide ainsi produit en arrière du perré avait dû y produire un léger tassement. Afin d'éviter cet inconvénient dans la suite du travail, l'on a construit le revêtement par tranches horizontales de 0m30 à 0m50 de hauteur seulement, en remplissant les vides entre les pierres sèches par des débris et par du sable fortement arrosé. Grâce à cette précaution, le perré a été achevé sans fissure et sans nouveau tassement.

(1) *Annales des ponts et chaussées*. 1860.

Afin de garantir le terre-plein de la digue du choc des vagues qui viennent y déferler par les forts ouragans, l'on a exécuté en arrière du couronnement, sur 4m00 de largeur, un dallage en moellons smillés, sur couche de terre glaise, le tout ayant une épaisseur de 0m40. Ce dallage a encore été prolongé de 1m50 par une espèce de bétonnage composé de débris de carrières pilonés dans la terre de schorre sur 0m20 environ de profondeur.

Le revêtement ainsi construit a résisté aux plus violents coups de mer; il se trouve encore aujourd'hui en parfait état de conservation. L'impuissance des vagues contre un revêtement aussi mince doit être attribuée autant à la forme courbe du parement qu'au parfait remplissage de la maçonnerie en pierres sèches avec du sable fin bien tassé par l'arrosage.

# CHAPITRE SEPTIÈME.

## MURS DE REVÊTEMENT.

---

### Calcul et discussion de l'épaisseur.

La théorie admise aujourd'hui par la plupart des constructeurs pour déterminer la poussée des terres contre les murs de revêtement repose sur quelques principes posés par *Coulomb,* parmi lesquels on peut citer les trois propositions suivantes, véritablement fondamentales : 1° les résultantes des poussées horizontales croissent directement comme les carrés des hauteurs de surface pressée; 2° le point d'application de ces résultantes est situé au tiers de ces mêmes hauteurs, à partir de la base; 3° les remblais compris dans le triangle de plus grande poussée sont les seuls qui déterminent cette force.

Les principes de *Coulomb* ont servi de base aux recherches analytiques de M. *De Prony,* qui ensuite ont été étendues et généralisées par MM. *Français* et *Audoy.* Plus tard, dans un mémoire inséré au 7e volume du *Mémorial du Génie,* M. *Poncelet* a remplacé les solutions analytiques de la question par une méthode graphique aussi simple que générale. Ce procédé de solution a permis à l'illustre ingénieur d'introduire dans les données du problème la considération du frottement des terres sur le parement intérieur du mur, frottement que M. *De Prony* n'avait pas apprécié exactement, et que MM. *Français* et *Audoy* avaient cru pouvoir négliger tout à fait.

La méthode de ces derniers auteurs étant généralement adoptée, nous allons en exposer brièvement les bases et les résultats.

Lorsqu'un massif de terre est coupé à pic, il ne tarde pas à s'en détacher un prisme à base triangulaire, et le plan de séparation, ou talus du massif, restant à une inclinaison plus roide que celle du *talus naturel* des terres considérées, le massif n'arrive à ce dernier talus qu'après l'éboulement de plusieurs autres prismes de plus en plus petits. Il suit de là que le prisme de *plus grande poussée,* c'est-à-dire celui qui tend à s'ébouler le premier et qui est le plus considérable, doit seul être introduit dans le problème de la poussée, contrairement aux idées de *Bélidor* et des autres ingénieurs qui ont précédé *Coulomb.*

Dans la théorie de MM. *Français* et *Audoy*, la poussée P, due au poids Q du prisme de rupture, est censée agir tout entière pour renverser le mur, c'est-à-dire, est supposée *normale* au parement intérieur AC (fig. 15). Ainsi que nous le verrons plus loin, cette hypothèse est inexacte, la poussée employant une partie de sa puissance à produire sur AC un frottement qui favorise la stabilité du revêtement.

Supposons que AE soit le plan de rupture du prisme CAE de plus grande poussée, et remplaçons l'action résistante du mur par une force P, égale à la poussée et normale à AC.

Décomposant P et Q normalement et parallèlement à AE, nous aurons là quatre composantes :

$$P \sin. \omega \quad \text{et} \quad P \cos. \omega$$
$$Q \cos. (\omega - \varepsilon) \quad \text{et} \quad Q \sin. (\omega - \varepsilon)$$

La composante de Q parallèle à AE, c'est-à-dire, Q cos. $(\omega - \varepsilon)$ agira seule pour faire descendre le prisme CAE ; cette force devra vaincre non-seulement la composante P sin. $\omega$, qui lui est opposée, mais les frottements $f$ Q sin. $(\omega - \varepsilon)$ et $f$ P cos. $\omega$ produits sur le plan AE par les deux autres composantes.

L'équation d'équilibre sera donc :

$$Q \cos. (\omega - \varepsilon) = P \sin. \omega + f. P \cos. \omega + f. Q \sin. (\omega - \varepsilon)$$

M. *Français* ajoute au second membre la force de cohésion des terres ; désignant par $c$ la valeur de cette force par unité de surface, son action sera représentée par $c \times AE = \frac{ch}{\cos. (\omega - \varepsilon)}$, où $h$ exprime la hauteur AB des terres.

Il nous paraît impossible d'admettre l'action simultanée de la force de cohésion et du frottement. Si l'on tient compte de ce dernier, c'est qu'on suppose déjà la cohésion détruite le long du talus AE; d'ailleurs, l'instant le plus critique est celui où les maçonneries sont encore fraîches, et pour ce moment les terres du prisme dangereux n'ont guère de cohésion, puisqu'elles viennent d'être remblayées.

Comme le coefficient $f$ est une constante, et représente le rapport du frottement à la pression normale qui le produit, le parallélogramme des forces donne :

$$mn = no \text{ tang. } \varphi = no \cot \alpha$$

$$\cot \alpha = \frac{mn}{no} = f$$

Appelant $p$ le poids spécifique des terres, nous aurons aussi :

$$\text{surface ABE} = \frac{h^2}{2} \text{ tang. } (\omega - \varepsilon)$$

$$\text{surface ABC} = \frac{h^2}{2} \text{ tang. } \varepsilon$$

$$Q = \frac{ph^2}{2} [\text{tang. } (\omega - \varepsilon) + \text{tang. } \varepsilon]$$

Et, par suite :

$$P = \frac{ph^2}{2} \frac{[\text{tang. } (\omega - \varepsilon) + \text{tang. } \varepsilon] \sin. (\alpha + \varepsilon - \omega)}{\cos. (\alpha - \omega)} - \frac{ch \sin. \alpha}{\cos. (\omega - \varepsilon) \cos. (\alpha - \omega)} \quad \ldots (1)$$

Afin de trouver la valeur de l'angle $\omega$ qui correspond à la poussée maxima, l'auteur pose la relation :

$$\frac{dP}{d\omega} = 0$$

et en tire la valeur suivante :

$$\omega = \frac{\alpha + \varepsilon}{2}$$

c'est-à-dire que l'angle du prisme de plus grande poussée est égal à *la moitié* de l'angle du talus naturel des terres avec le parement intérieur. Ainsi :

$$\text{Angle CAE} = \frac{\alpha + \varepsilon}{2}$$

Cette propriété avait déjà été démontrée par M. *De Prony* pour le cas d'un parement intérieur vertical. Il est à remarquer que l'angle de plus grande poussée est indépendant de la cohésion, quoique la poussée en dépende.

Remplaçant $\omega$ par $\frac{\alpha + \varepsilon}{2}$ dans l'équation (1), nous aurons pour l'expression de la poussée maxima :

$$P = \frac{ph^2}{2}\left(\text{tang.}\,\frac{\alpha - \varepsilon}{2} + \text{tang.}\,\varepsilon\right)^2 \cos.\,\varepsilon - \frac{ch \sin\alpha}{\cos.^2 \frac{\alpha - \varepsilon}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

Si le parement intérieur est incliné vers les terres, l'angle $\varepsilon$ change de signe, et il en résulte :

$$P = \frac{ph^2}{2}\left(\text{tang.}\,\frac{\alpha + \varepsilon}{2} - \text{tang.}\,\varepsilon\right)^2 \cos.\,\varepsilon - \frac{ch \sin.\,\alpha}{\cos.^2 \frac{\alpha + \varepsilon}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

Pour un parement intérieur vertical, $\varepsilon = 0$ d'où :

$$P = \frac{ph^2}{2}\,\text{tang.}^2\,\frac{\alpha}{2} - \frac{ch \sin.\,\alpha}{\cos.^2 \frac{\alpha}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

Quoique toutes les terres finissent par s'ébouler quand on les creuse à pic sur une profondeur suffisante, la plupart se maintiennent cependant ainsi lorsqu'on ne dépasse pas en profondeur une certaine limite $h'$, que l'on peut obtenir par expérience ; dans ce dernier cas, la poussée est détruite par la cohésion. L'on aura donc $c$ par l'une des relations :

$$o = \frac{ph'^2}{2}\left(\text{tang.}\,\frac{\alpha \mp \varepsilon}{2} \pm \text{tang.}\,\varepsilon\right)^2 \cos.\,\varepsilon - \frac{ch' \sin.\,\alpha}{\cos.^2 \frac{\alpha \mp \varepsilon}{2}}$$

ou bien :

$$o = \frac{ph'^2}{2}\,\text{tang.}^2\,\frac{\alpha}{2} - \frac{ch' \sin.\,\alpha}{\cos.^2 \frac{\alpha}{2}}$$

et les équations (2) (3) et (4) deviendront :

$$P = \frac{ph}{2}(h - h')\left(\text{tang.}\,\frac{\alpha \mp \varepsilon}{2} \pm \text{tang.}\,\varepsilon\right)^2 \cos.\,\varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

$$P = \frac{ph}{2}(h - h')\,\text{tang.}^2\,\frac{\alpha}{2} \quad \ldots\ldots\ldots (6)$$

Pour trouver le moment PL de la poussée, M. *Français* détermine le moment élémentaire de cette force, ou $dP$, sur une fraction infiniment petite $dz$ de la hauteur; puis il intègre entre $z = h'$ pour laquelle $P = o$, et $z = h$; il obtient ainsi la valeur :

$$PL = \frac{p}{2}\left(\text{tang.}\frac{\alpha \mp \varepsilon}{2} \pm \text{tang.}\,\varepsilon\right)\left[h^2\left(\frac{h}{3} - \frac{h'}{2}\right) \mp h(h - h')x\sin.\varepsilon\cos.\varepsilon\right] \ldots\ldots\ldots (7)$$

dans laquelle $x$ est l'épaisseur AO de la base du mur.

Pour obtenir L il suffit de diviser la relation (5) par (7); l'on trouve que le point d'application de la poussée se trouve *un peu au-dessous du tiers* de la hauteur ou du parement intérieur. Si l'on avait négligé la cohésion, l'on serait retombé sur l'un des principes fondamentaux de *Coulomb* qui fixe ce point au tiers de la hauteur exactement.

Cherchons maintenant le moment $ml$ du revêtement. A cet effet, posons :

$$AO = x, \quad Ab = H, \quad \frac{cb}{Ab} = n, \quad \frac{ed}{Oe} = n'; \quad OO'' = l.$$

et représentons par $p'$ le poids spécifique de la maçonnerie, dont nous supposons le centre de gravité en M. Nous trouverons facilement :

$$ml = \frac{p'H}{2}\left[x^2 \mp Hx\,\text{tang.}\,\varepsilon + \frac{H^2}{3}(\text{tang.}^2\,\varepsilon - \text{tang.}^2\,\varepsilon')\right] \ldots\ldots\ldots (8)$$

ou bien :

$$ml = \frac{p'H}{2}\left[x^2 \mp Hxn + \frac{H^2}{3}(n^2 - n'^2)\right] \ldots\ldots\ldots (9)$$

Si $\varepsilon = 0$ ou $n = 0$

$$ml = \frac{p'H}{2}\left(x^2 - \frac{n'^2H^2}{2}\right)$$

Si, en outre, $\varepsilon' = 0$ ou $n' = 0$, c'est-à-dire, si les deux parements sont verticaux :

$$ml = \frac{p'H}{2}x^2$$

Pour obtenir l'équation d'équilibre, il suffit de poser :

$$PL = ml \quad \ldots\ldots\ldots (10)$$

c'est-à-dire, d'égaler les valeurs de PL et de $ml$ tirées des relations (7) et (8). L'on en tire la valeur de $x$, qui, pour le cas général, est assez compliquée

Les épaisseurs de murs que l'on obtient par les formules précédentes ne correspondent qu'à l'état d'équilibre, et seraient par conséquent trop faibles dès que la moindre force accidentelle viendrait augmenter l'action de la poussée.

La méthode usitée généralement pour obtenir, au moyen d'équations d'équilibre, des quantités applicables à la pratique, consiste à comparer les résultats fournis par ces équations à ceux que l'on peut mesurer sur des constructions analogues dont le temps a sanctionné la stabilité.

Ce procédé empirique présente sans doute des garanties suffisantes de sécurité. Mais il ne faut pas perdre de vue que son application illimitée conduirait à un *statu quo* éternel, qui annihilerait indirectement tout progrès, toute modification plus ou moins radicale dans la solution des problèmes.

La seule méthode rationnelle de vérifier une théorie, c'est d'en soumettre directement les résultats à la sanction de l'expérience. Ce moyen, il est vrai, est souvent coûteux et présente d'ordinaire de grandes difficultés dans l'opération, mais on n'en doit pas moins y avoir recours chaque fois qu'il sera praticable.

Ainsi que nous l'avons dit, pour obtenir des épaisseurs de revêtements applicables à la pratique, on multiplie le moment de la poussée, dans l'équation $PL = ml$, par un certain coefficient $k$, que l'on nomme *coefficient de stabilité*, et dont la détermination se fait par l'examen d'anciennes constructions analogues qui ont résisté à la durée.

Si l'on veut, par exemple, donner au mur à construire une stabilité égale à celle d'un mur de *Vauban*, de dimensions *moyennes*, il faut faire, dans l'équation d'équilibre (10) :

$$n \text{ ou } \varepsilon = 0, \quad \frac{p}{p'} = \frac{1500}{2200}, \quad \alpha = 45^\circ, \quad n' = 0{,}20$$
$$H = 10, \quad h = 12$$

et en outre multiplier le premier membre par $k$. De cette nouvelle équation on tire la valeur de $x$, et on l'égale à celle que l'on obtient par la formule de *Vauban*, et qui est :

$$x = 1^m{,}624 + 0{,}20\,H$$
$$x = 3^m{,}624$$

Cette identité donne pour $k$ une valeur :

$$k = 1{,}80$$

L'on obtient ainsi les formules pratiques suivantes, en supposant que l'action de la cohésion soit nulle.

1° Terres quelconques ; parement intérieur vertical :

$$x = \sqrt{1{,}80 \frac{p}{3p'} \cdot \frac{h^5}{H} \text{tang.}^2 \frac{\alpha}{2} + \frac{H^5}{3} \text{tang.}^2 n'} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (a)$$

2° Terres quelconques ; parements verticaux :

$$x = \text{tang.} \frac{\alpha}{2} h \sqrt{1{,}80 \frac{p}{3p'} \cdot \frac{h}{H}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (b)$$

3° Terres et maçonneries moyennes ; parement intérieur vertical :

$$x = \sqrt{0{,}063 \frac{h^5}{H} + 0{,}33\, H^2 \text{tang.}^2 n'} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (c)$$

4° Terres et maçonneries moyennes ; parements verticaux :

$$x = 0{,}258\, h \sqrt{\frac{h}{H}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (d)$$

Pour $H = h$, ces formules deviennent :

$$x = H \sqrt{1{,}80 \frac{p}{3p'} \text{tang.}^2 \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{3} \text{tang.}^2 n'} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (a')$$

$$x = H \text{tang.} \frac{\alpha}{2} \sqrt{1{,}80 \frac{p}{3p'}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (b')$$

$$x = H \sqrt{0{,}063 + 0{,}33 \text{tang.}^2 n'} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (c')$$

$$x = 0{,}258\, H \quad \ldots\ldots\ldots \quad (d')$$

D'après M. *Français*, l'on peut adopter pour formules pratiques :

1° $H = h$ et parements verticaux :

$$x = H \text{tang.} \frac{\alpha}{2} \sqrt{N \frac{p}{3p'}}$$

dans laquelle N varie de 1,40 à 2,10.

2° $\alpha = 45°$, $\frac{p}{p'} = \frac{2}{3}$, et parements inclinés ; ici, $h' = h - H$ :

$$x = 0{,}26\,(H + h') \sqrt{\frac{H + h'}{H}} \quad \text{ou bien :} \quad x = 0{,}26\, h \sqrt{\frac{h}{H}}$$

3° $\alpha = 45°$, $\frac{p}{p'} = \frac{2}{3}$, et parements verticaux :

$$x = 0,285\,(H + h') = 0,285\,h$$

M. *Poncelet* donne la formule empirique suivante, pour des terres et maçonneries quelconques, et des parements verticaux. Elle est basée, d'après *Vauban*, sur un moment de résistance plus fort des quatre cinquièmes que celui de la poussée des terres :

$$x = 0,845\,(H + h')\,\text{tang.}\,\frac{\alpha}{2}\sqrt{\frac{p}{p'}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (f)$$

qui devient pour $\alpha = 45°$ et $\frac{p}{p'} = \frac{2}{3}$ :

$$x = 0,285\,(H + h') = 0,285\,h$$

La formule employée vulgairement par les constructeurs est :

$$x = 0,27\,h$$

qui devient :

$$x = 0,27\,H$$

pour les remblais arasés de niveau avec le sommet du mur.

Suivant M. *Poncelet*, la formule (*f*) peut s'appliquer aux revêtements dont le parement extérieur est incliné, pourvu que le fruit ne dépasse pas $\frac{1}{8}$ ; elle donnerait alors l'épaisseur $x$ à $\frac{1}{9}$ de hauteur au-dessus de la base. Cette règle est tirée de la transformation du profil de *Vauban*, qui repose sur ce principe : tous les profils de revêtements à parement intérieur vertical, de même hauteur et de même stabilité, mais dont les parements extérieurs sont inclinés à moins de $\frac{1}{8}$ sur la verticale, ont, à $\frac{1}{120}$ près, la même épaisseur à $\frac{1}{9}$ de leur hauteur à partir de la base ; il suit de là que, jusqu'à cette limite, pour transformer un profil en un autre, il suffit de faire tourner le parement extérieur donné autour d'une horizontale comme axe, jusqu'à ce qu'il ait l'inclinaison voulue, cette horizontale étant tracée dans le revêtement donné et à $\frac{1}{9}$ de sa hauteur.

Si le fruit variait de 0 à $\frac{1}{2}$, la même égalité aurait encore lieu, mais seulement à $\frac{1}{70}$ près.

L'on peut donc facilement déterminer un profil quelconque qui ait une stabilité équivalente à celle du revêtement type de *Vauban ;* mais, si l'on veut avoir une résistance absolue égale à celle des revêtements

construits par l'illustre ingénieur, il est nécessaire de tenir compte de l'excès de force apporté par ses contre-forts.

Le tableau suivant donne les valeurs de $\frac{x}{H}$ pour diverses terres et maçonneries et pour des hauteurs de surcharges comprises entre $h = 0$ et $h = 2\,H$; l'on y admet l'hypothèse de la rotation, et une stabilité équivalente à celle du revêtement modèle de *Vauban*, sans tenir compte des contre-forts.

| VALEUR DE $\frac{h}{H}$ | VALEUR DE $\frac{x}{H}$ POUR | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\frac{p'}{p}=1$ $\frac{1}{\text{tang.}\,\alpha}=0{,}60$ | $\frac{p'}{p}=1$ $\frac{1}{\text{tang.}\,\alpha}=1{,}4$ | $\frac{p'}{p}=1{,}5$ $\frac{1}{\text{tang.}\,\alpha}=1$ | $\frac{p'}{p}=\frac{5}{3}$ $\frac{1}{\text{tang.}\,\alpha}=0{,}60$ | $\frac{p'}{p}=\frac{5}{3}$ $\frac{1}{\text{tang.}\,\alpha}=1{,}4$ |
| 0,00 | 0,452 | 0,258 | 0,270 | 0,350 | 0,198 |
| 0,10 | 0,498 | 0,282 | 0,303 | 0,393 | 0,222 |
| 0,20 | 0,548 | 0,309 | 0,336 | 0,439 | 0,249 |
| 0,30 | 0,604 | 0,338 | 0,368 | 0,485 | 0,274 |
| 0,40 | 0,665 | 0,369 | 0,399 | 0,532 | 0,303 |
| 0,50 | 0,726 | 0,402 | 0,436 | 0,579 | 0,332 |
| 0,60 | 0,778 | 0,436 | 0,477 | 0,617 | 0,360 |
| 0,70 | 0,824 | 0,472 | 0,512 | 0,645 | 0,387 |
| 0,80 | 0,867 | 0,510 | 0,544 | 0,668 | 0,413 |
| 0,90 | 0,903 | 0,541 | 0,575 | 0,690 | 0,437 |
| 1,00 | 0,930 | 0,571 | 0,603 | 0,707 | 0,457 |
| 1,40 | 1,023 | 0,684 | 0,696 | 0,762 | 0,537 |
| 1,80 | 1,084 | 0,772 | 0,769 | 0,797 | 0,594 |
| 2,00 | 1,107 | 0,812 | 0,795 | 0,811 | 0,622 |

La valeur de l'angle $\alpha$ doit se déterminer par expérience. Afin de tenir implicitement compte de la cohésion des terres, il suffit de creu-

ser à pic et de vérifier l'angle d'éboulement. L'on trouve approximatitement :

| | |
|---|---|
| Sable fin très-sec. . . . . | $\alpha = 59°$ |
| Terre sèche et pulvérisée . . . . | $\alpha = 54°$ |
| Terre humectée . . . . . | $\alpha = 46° 40'$ |
| Terre moyenne non mouillée . . . | $\alpha = 45°$ |
| Terre très-forte . . . . . | $\alpha = 35°$ à $31°$ |

qui correspondent respectivement à des bases de 1,66, de 1,40, de 1,05, de 1 et de 0,70 à 0,60.

Pour les valeurs de $f$ et de C, l'on peut adopter :

| | |
|---|---|
| Sur béton, maçonnerie ou rocher. . . | $f = 0,76$ |
| Sur terre ou sable . . . . . | $f = 0,57$ |
| Sur fond argileux exposé à être détrempé. | $f = 0,30$ |
| Cohésion par mètre carré sur béton. . | $C = 10,000^k$ à $144,000^k$ |
| Id. sur le sol. . | $C = 0$ |

La cohésion varie selon que le mortier est de bonne ou de médiocre qualité; c'est pour ce motif que les limites en sont très-étendues.

Les diverses valeurs de $p$ et $p'$ sont indiquées au tableau suivant.

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | POIDS du MÈTRE CUBE. | NOMS des OBSERVATEURS. |
|---|---|---|
| Terre ou sable de bruyère . . . . . | 614 à 645 | Génieys. |
| » végétale . . . . . | 1214 à 1285 | Idem. |
| » idem . . . . . | 1400 | Poncelet. |
| » forte graveleuse . . . . . | 1357 à 1428 | Génieys. |
| » argileuse. . . . . | 1600 | Poncelet. |
| » glaise. . . . . | 1900 | Idem. |
| » mêlée de petites pierres . . . . . | 1910 | Génieys. |
| » grasse mêlée de cailloux . . . . . | 2290 | Idem. |
| Grosse terre avec sable et gravier . . . . | 1860 | Idem. |
| Vase . . . . . | 1642 | Idem. |
| Marne . . . . . | 1571 à 1642 | Idem. |
| Sable fin et sec. . . . . | 1399 à 1428 | Idem. |
| » fin et humide . . . . . | 1900 | Idem. |
| » de rivière, humide . . . . . | 1771 à 1856 | Idem. |
| » terreux . . . . . | 1700 | Poncelet. |
| Briques plus ou moins cuites . . . . . | 2200 à 1500 | Idem. |
| » idem. . . . . | 1471 à 1000 | Génieys. |
| Mortier ordinaire . . . . . | 1856 à 2142 | Idem. |
| Maçonnerie fraîche en briques . . . . . | 1860 à 1890 | Idem. |
| » » en moellons . . . . | 2230 à 2250 | Idem. |
| » de moellons ordinaires. . . . | 1700 à 2300 | Poncelet. |

Les formules précédentes déterminent l'épaisseur à donner au mur pour empêcher son renversement autour de l'arête extérieure O. Comme le revêtement doit en outre résister au glissement sur la base AO, il faut que la poussée P soit tout au plus égale au frottement sur les fondations augmenté de la cohésion entre celles-ci et la maçonnerie supérieure.

Appelant $f'$ le coefficient de ce frottement, et $c$ la cohésion, par mètre carré, sur la base, la deuxième condition d'équilibre sera représentée par l'équation :

$$P \text{ ou } \frac{pH^2}{2}\left(\text{tang. } \frac{\alpha - \varepsilon}{2} + \text{tang. } \varepsilon\right)^2 \cos. \varepsilon = f'p'\left(\frac{nH^2}{2} + Hx + \frac{n'H^2}{2}\right) + c\,(nH + x + n'H) \quad \ldots\ldots\ldots \ (g)$$

qui devient pour $H = h$ et pour des parements verticaux :

$$\frac{pH^2}{2} \text{ tang. } \frac{\alpha}{2} = f'p'Hx + cx$$

Supposons maintenant un revêtement déterminé par la formule $(g)$. Représentons par A l'excès de la poussée P sur le frottement des fondations sur le sol, et par H' la profondeur à donner à ces fondations pour que la résistance au glissement soit suffisante. La valeur de H' sera donnée par l'équation suivante :

$$H' = k' \text{ tang. } \frac{\alpha + \varepsilon}{2} \sqrt{\frac{2A}{p}} \quad \ldots\ldots\ldots \ (h)$$

dans laquelle $k' = 1{,}40$ et $A = P$ — le frottement, ou bien :

$$A = \frac{pH^2}{2}\left(\text{tang. } \frac{\alpha - \varepsilon}{2} + \text{tang. } \varepsilon\right)^2 \cos. \varepsilon - f''p'\left[\frac{n\,(H + H')^2}{2} + (H + H')\,x + \frac{n'\,(H + H')^2}{2}\right] \quad \ldots\ldots\ldots \ (m)$$

en admettant que le poids spécifique des fondations soit le même que celui du revêtement.

Comme la valeur de A est fonction de H', on peut, afin de faire disparaître cette inconnue du deuxième membre de la formule $(h)$, négliger H' par rapport à H dans la relation $(m)$, et poser par approximation :

$$A = \frac{pH^2}{2}\left(\text{tang. } \frac{\alpha - \varepsilon}{2} + \text{tang. } \varepsilon\right)^2 \cos. \varepsilon - f''p'\left(\frac{nH^2}{2} + Hx + \frac{n'H^2}{2}\right)$$

et remplacer A par cette dernière valeur dans la formule $(h)$.

Sur un sol argileux, qui est celui où le glissement est le plus à craindre, on aurait environ : $\alpha = 54°$, $p = 1500^k$ et $f'' = 0{,}30$.

D'après M. *Français,* le revêtement qui offrirait le plus grand moment de résistance pour une surface donnée serait celui qui aurait le talus extérieur le plus grand possible, en donnant au talus intérieur un talus de $\frac{1}{6}$ vers les terres ($\varepsilon$ négatif).

Quoi qu'il en soit, il serait au moins indispensable de s'assurer par le calcul que ce genre de revêtement n'est pas exposé à glisser vers l'avant, et à se renverser sur son talus intérieur après avoir basculé autour de l'arête A. Cette disposition entraîne aussi avec elle l'hypothèse d'une base inébranlable.

Ainsi que nous l'avons vu, la théorie que nous venons d'exposer ne tient aucun compte du frottement des terres contre le parement intérieur du mur. Quelques ingénieurs admettent, contrairement à l'avis de *Coulomb,* que ce frottement est égal à celui des terres sur elles-mêmes. Mais les expériences du lieutenant-colonel *Audé* ont prouvé que le frottement des terres le long de parois d'appui mobiles est variable suivant le mode d'expérimentation ; que, dans le cas du renversement de ces parois par rotation autour d'un axe, il est toujours moindre que celui des terres sur elles-mêmes ; et que, pour un même talus naturel de celles-ci, cette infériorité est d'autant plus sensible que les particules élémentaires du remblai sont d'une plus grande ténuité.

Dans ces expériences, M. *Audé* s'est servi de deux sables purs, très-secs, et par conséquent sans cohésion sensible. L'un d'eux, le plus gros, provenait de la Seine, et avait été passé à la claie de façon à en enlever les grains qui dépassaient en grosseur 5 à 6 millimètres ; l'autre sable, très-fin, très-coulant, était formé des poussières de grès de Fontainebleau. Le talus naturel de ces deux qualités de sable sec est de 1 1/2 de base pour 1 de hauteur ; d'où l'on conclut :

$$\text{tang. } \varphi = 0{,}67$$

La poussée totale $m$L (fig. 16) n'est donc pas normale au parement BH, comme on l'admet généralement ; sa direction est oblique, puisqu'elle est la résultante d'une pression normale $n$L qui tend à renverser le mur, et du frottement $nm$ des terres sur la maçonnerie, frottement qui favorise la stabilité. Cette direction $m$L de la poussée est donc perpendiculaire à une droite BB'F', qui fait avec le parement

un angle $\varphi'$ égal à celui dont la tangente mesure le rapport du frottement à la pression :

$$mn = nL \text{ tang. } \varphi'$$

$$\text{tang. } \varphi' = \frac{mn}{nL} = f'$$

Or, si on cherche le moment de cette résultante, pris par rapport à l'arête antérieure A de la base BA du mur, on voit, qu'en raison de sa direction oblique, son bras de levier diminue à mesure que le parement intérieur s'incline davantage ou que l'angle $\varepsilon$ augmente, de telle façon que ce moment peut devenir nul ou négatif. Il sera nul quand $mL$ prolongée passera par l'arête A; il y aura alors équilibre strict dans le système; le moment sera négatif quand $mL$ passera à l'intérieur de la base BA; la stabilité sera alors supérieure à celle de l'équilibre strict, et le degré de stabilité ira en croissant jusqu'à une certaine limite.

Il existe donc, suivant M. *Ardant*, deux moyens d'établir l'équilibre entre les murs de revêtement et les terres qui tendent à les déplacer. Le premier moyen, généralement usité, consiste à augmenter le moment de la résistance, soit en donnant au mur un poids plus ou moins considérable, soit en lui donnant une section telle, que son centre de gravité soit reporté le plus loin possible en arrière de l'arête A. Le second moyen proposé par l'auteur, mais qui n'a pas encore acquis la sanction de l'expérience, consiste à diminuer le bras de levier de la puissance, et par suite son moment, en inclinant *de dedans en dehors* le parement intérieur autant que le permettraient, dans chaque cas particulier, la nature du sol et la quantité des déblais à effectuer pour l'établissement des fondations. Partant de là, M. *Ardant* établit qu'il n'existe pas un seul mur de revêtement à parements verticaux qu'on ne puisse, avec avantage, remplacer par un mur à paroi intérieure inclinée, d'un profil sensiblement plus économique.

Dans l'exposé de sa théorie analytique de la poussée des terres (1), M. *Ardant* s'appuie sur les principes et sur le mode d'exposition adoptés par M. *Poncelet* (2) dans sa méthode de construction géomé-

(1) *Mémorial de l'officier du Génie.* IXe volume.
(2) *Mémorial de l'officier du Génie.* VIIe volume.

trique directe; il ne fait qne reproduire algébriquement cette dernière, et l'applique aux cas ordinaires de la pratique.

Pour les demi-revêtements, et pour les profils compliqués par l'existence d'une surcharge non uniforme, M. *Ardant* détermine le plan de rupture BR (fig. 17) par une *courbe d'erreur* BPP', construite au moyen de diverses positions de ce plan, et dont la tangente PS parallèle à la droite BM, prise pour axe des $x$, répond à un maximum; le point P ainsi déterminé appartient donc à la ligne de rupture cherchée, qui est assujettie en outre à passer par le point B. L'ordonnée maxima PQ de cette courbe, menée parallèlement à BO, étant précisément celle qui correspond au prisme de plus grande poussée, représente une grandeur proportionnelle à la résultante de la force normale à la paroi et du frottement qu'elle engendre, c'est-à-dire, une longueur proportionnelle à la poussée totale.

Mais, dans ce cas, la valeur de cette résultante est représentée par une expression trop compliquée pour qu'on puisse s'en servir à trouver, soit l'épaisseur nécessaire à un mur de revêtement, soit le coefficient ou degré de stabilité que possède un mur dont l'épaisseur est fixée *à priori;* il faut alors nécessairement se contenter d'une valeur approchée du moment de la poussée A cet effet, l'auteur détermine, par des procédés de calcul analogues aux procédés géométriques employés par M. *Poncelet,* la limite supérieure de la hauteur du point d'application de la poussée contre le parement intérieur mesurée à partir de l'arête B sur le sol. Prenant cette limite supérieure pour constante, il obtient une valeur maxima du bras de levier de la poussée, dont l'adoption donne à celle du moment une forme suffisamment simple pour que l'équation d'équilibre entre le moment de la puissance et celui de la résistance se prête aux calculs qu'entraîne l'application de la théorie à la pratique.

Ce tâtonnement, par une courbe d'erreur, n'est pas nécessaire lorsqu'il s'agit d'un remblai terminé à sa partie supérieure par un plan indéfini OHM (fig. 17) passant par le sommet H du parement intérieur. Dans ce cas particulier, on trouve facilement la position de la ligne de rupture BR. Si l'on représente par :

$\varphi$ l'angle du frottement des terres sur elles-mêmes, ou l'angle du talus naturel;

$\alpha$ le complément de $\varphi$ ;

$\varphi'$ l'angle du frottement des terres sur la maçonnerie ;

$\theta$ l'angle RKV formé par l'inclinaison de MHO sur la verticale ;

$\varepsilon$ l'angle d'inclinaison du parement intérieur sur la verticale;

et si l'on prend respectivement BM et MRHO pour axes des $x$ et des $y$, les coordonnées du point P de la courbe correspondant au maximum, c'est-à-dire à la tangente parallèle aux $x$, seront :

$$x = a - \frac{1}{2} \sin. (\theta \pm \varepsilon) (ma - r)$$

$$y = \frac{1}{2} m \sin. (\theta \pm \varepsilon) (2ma - b - 2r)$$

expressions dans lesquelles :

$$a = h \frac{\sin. (\theta \pm \varepsilon)}{\sin. (\theta - \alpha)} \quad b = h \frac{\sin. (\alpha \pm \varepsilon)}{\sin. (\theta - \alpha)}$$

$$m = \frac{\cos. (\varphi' \pm \varepsilon)}{\sin. (\varphi + \varphi' + \theta \pm \varepsilon)}$$

La droite qui passe par ce point et par l'arête B a pour équation :

$$y = \frac{m (2ma - b - 2r)}{ma - r} (a - x)$$

si on la construit, on retombe sur le théorème donné par M. *Poncelet* dans sa méthode géométrique, et qu'on peut énoncer comme suit :

« la ligne de rupture BR vient couper la face supérieure MH du « remblai en un point R, tel que la distance OR est égale à la lon- « gueur de la tangente OR′ menée du point O à la demi-circonférence « décrite sur MH comme diamètre. »

La ligne BO fait ici avec BH un angle égal à $\varphi + \varphi'$.

Déterminons la poussée maxima, c'est-à-dire l'ordonnée PQ parallèle à BO. Le triangle PQ$x$ donne :

$$\frac{PQ}{Px} = \frac{\sin. (\theta - \alpha)}{\cos. (\varphi' \pm \varepsilon)}$$

$$\overline{PQ} = \overline{Px} \text{ ou } y \times \frac{\sin. (\theta - \alpha)}{\cos. (\varphi' \pm \varepsilon)}$$

remplaçant, dans PQ, $y$ par sa valeur mise sous la forme :

$$y = \frac{1}{2} m \sin. (\theta \pm \varepsilon) (\sqrt{ma} - \sqrt{ma - b})^2$$

et substituant à $m$, $a$ et $b$ leurs valeurs données plus haut, l'on obtient une relation de la forme :

$$\overline{PQ} \text{ ou } P = \frac{1}{2} Ah$$

dans laquelle la valeur de A est encore assez compliquée :

$$A = \frac{\sin.^2 (\alpha \pm \varepsilon)}{\cos. (\varphi' \pm \varepsilon)} \left[ \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \frac{\sin. (\alpha \pm \varepsilon) \sin. (\varphi + \varphi' + \theta \pm \varepsilon)}{\sin. (\theta \pm \varepsilon) \cos. (\varphi' \pm \varepsilon)}}} \right]^2$$

Recherchant ensuite le point d'application de cette poussée P, dont on connaît désormais la grandeur et la direction LL′ perpendiculaire sur BF′ (fig. 16), M. *Ardant* arrive au deuxième théorème connu :

« la force de poussée des terres est appliquée sur le parement BH « au *tiers* de la longueur de cette paroi, mesuré à partir du point B. »

Connaissant BB′, il en conclut facilement AL′ correspondant à une épaisseur donnée $e' = BA$; et le moment $M = P \times AL'$ devient :

$$M = \frac{1}{6} \cdot pAh^2 \left[ \cos. \varphi' \mp \frac{3e' \sin. (\varphi' \pm \varepsilon)}{h} \right] \text{.....} (v)$$

Il est préférable de mettre cette expression sous une autre forme, en remplaçant le deuxième membre par la somme des *moments* des deux composantes qui sont :

P cos. $(\varphi' \pm \varepsilon)$ parallèle à l'horizon ;
P sin. $(\varphi' \pm \varepsilon)$ verticale;

et qui ont pour moments respectifs :

$$\frac{1}{6} pAh^3 \cos. (\varphi' \pm \varepsilon) \cos. \varepsilon$$

$$\mp \frac{1}{6} pAh^3 \left[ \frac{3e'}{h} \sin. (\varphi' \pm \varepsilon) \mp \sin. (\varphi' \pm \varepsilon) \sin. \varepsilon \right]$$

On voit que, dans ce dernier moment, il faudra donner au deuxième terme sin. $(\varphi' \pm \varepsilon)$ sin. $\varepsilon$ le signe — , lorsque la composante verticale

agira en sens inverse de la composante horizontale; les deux moments partiels doivent donc être affectés toujours de signes contraires, et l'on obtient :

$$M = \frac{1}{6}\, ph^3 A \left[\cos.\,(\varphi' \pm \varepsilon)\cos.\,\varepsilon - \sin.\,(\varphi' \pm \varepsilon)\left(\frac{3e'}{h} \mp \sin.\,\varepsilon\right)\right]$$

Si l'on veut donner au revêtement un surcroît de stabilité, il suffit de multiplier le moment de la force horizontale par un coefficient $\delta$ plus grand que l'unité. D'où :

$$M = \frac{1}{6}\, pAh^3 \left[\delta \cos.\,(\varphi' \pm \varepsilon)\cos.\,\varepsilon - \sin.\,(\varphi' \pm \varepsilon)\left(\frac{3e'}{h} \mp \sin.\,\varepsilon\right)\right]$$

Pour établir les équations générales qui assurent la stabilité du mur, tant pour le glissement que pour la rotation autour du point A, nous représenterons par :

M′ le moment du mur autour de A ;
$f''$ le coefficient du frottement des fondations sur le sol ;
Q le poids du revêtement sur l'unité de longueur ;
Q′ le poids des fondations sur l'unité de longueur ;

et les équations générales seront :

$$\delta M = M' \quad \ldots\ldots\ldots \quad (z)$$

$$\delta P \cos.\,(\varphi' \pm \varepsilon) = \left[f'' P \sin.\,(\varphi' \pm \varepsilon) + Q + Q'\right] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (z')$$

La comparaison des équations $(z)$ et $(z')$ avec les formules ordinaires conduit M. *Ardant* à des résultats très-remarquables, que nous allons brièvement exposer.

Cherchons d'abord, en nous basant sur les équations précitées, de combien la stabilité réelle des murs de revêtement à parements verticaux, dont l'épaisseur a été calculée par la formule $e = 0{,}27$ H, l'emporte sur la stabilité strictement nécessaire pour l'équilibre et que nous supposons déterminée par les formules $(z)$ et $(z')$ de M. *Ardant*.

Ces formules étant vraies dans tous les cas, nous supposerons, pour plus de simplicité que le remblai est terminé par une horizontale passant par le sommet du revêtement; nous prendrons aussi le cas particulier où :

$$p = p', \quad \varphi = \varphi' = 35°, \; \alpha = 90° - \varphi = 55°$$

$$\text{tang.}\,\varphi = 0{,}70 \quad \sin.\,\varphi = 0{,}573 \quad \cos.\,\varphi = 0{,}819$$

Après avoir fait, dans l'équation ($v$) :

$$\varepsilon = 0 \quad \theta = 90^\circ \quad 2\varphi = 70^\circ \quad \cos.\ 2\varphi = 0{,}342$$

et remarquant que $e' = 0{,}27$ H puisque $h = \mathrm{H}$, nous trouverons successivement :

$$\mathrm{A} = \frac{\cos.\ \varphi}{(1 + \sqrt{1 - \cos.\ 2\varphi})^2} = 0{,}25$$

$$\mathrm{M} = \frac{1}{6}\, p\mathrm{H}^3 \times 0{,}25\,(0{,}819\,\delta - 0{,}464)$$

$$\mathrm{M}' = \frac{1}{6}\, p\mathrm{H}^3 \times 0{,}219$$

$$\frac{1}{6}\, p\mathrm{H}^3 \times 0{,}25\,(0{,}819\,\delta - 0{,}464) = \frac{1}{6}\, p\mathrm{H}^3 \times 0{,}219$$

$$\delta = 1{,}636$$

Ainsi, la formule ordinaire : $e = 0{,}27$ H donne, pour le cas particulier examiné, une stabilité qui dépasse une fois et demie celle qui serait nécessaire à l'équilibre.

Cherchons maintenant l'épaisseur qu'il faudrait donner à la base d'un mur triangulaire de même hauteur H que le précédent, pour que la direction de la poussée vînt passer par l'arête extérieure O ; dans ce cas, le moment $\mathrm{M} = 0$; d'où :

$$\cos.\ \varphi' - \frac{3e' \sin.\ (\varphi' + \varepsilon)}{h} = 0$$

Ici $h$ représente la longueur BH du parement intérieur, ou bien H cos. $\varepsilon$ ; par suite :

$$\cos.\ \varphi' - \frac{3e' \sin.\ (\varphi' + \varepsilon)}{\mathrm{H} \cos.\ \varepsilon} = 0$$

$$e' = 0{,}75\ \mathrm{H}\ \mathrm{tang.}\ \varphi' \left(\sqrt{1 + \frac{0{,}888}{\mathrm{tang.}^2\ \varphi'}} - 1\right)$$

faisant encore ici : $\varphi' = 35^\circ$, nous obtiendrons :

$$e' = 0{,}355\ \mathrm{H}$$

La section du revêtement ainsi déterminée aurait une surface égale à 0,176 $\mathrm{H}^2$, tandis que celle du mur qui correspond à la formule ordinaire serait 0,270 $\mathrm{H}^2$. Or le premier est évidemment plus stable que

l'autre dont la résultante passe au-dessus du point O ; de là, un surcroît de solidité joint à une notable économie ; celle-ci est de 0,094 $H^2$ par mètre courant, soit 9,40 mètres cubes pour H = 10 mètres.

Les résultats que nous venons d'exposer sont sans doute très-remarquables ; mais, de l'aveu même de l'auteur, ils s'appuient sur des considérations purement théoriques, qui ont pour base l'hypothèse d'une cohésion suffisante pour que le renversement des murs se fasse tout d'une pièce autour de l'arête extérieure de leur base. Cette hypothèse est hasardée, sinon gratuite ; nous devons cependant reconnaître qu'elle a servi de point de départ à toutes les formules qu'on emploie pour calculer les épaisseurs des revêtements à murs verticaux ou peu inclinés ; l'hypothèse, pour ces cas particuliers, semble en effet confirmée par les expériences de M *Mayniel* (1).

Après avoir cherché à légitimer sa théorie par des considérations analytiques, M. *Ardant* cite quelques résultats des essais qu'il a tentés pour étendre aux revêtements inclinés les conclusions de M. *Mayniel* sur la cohésion des murs verticaux. Il rapporte que tous les murs essayés, dont la maçonnerie avait une cohésion très-ordinaire, se sont rompus d'une seule pièce autour de l'arête extérieure de leur base, qu'il y eût ou qu'il n'y eût pas adhérence avec le sol.

Faute d'une sanction suffisante de l'expérience, il est impossible de tirer des conclusions absolues d'une théorie qui pourrait produire un changement complet dans la pratique de la construction des murs de revêtement. Nous nous bornerons à constater que la théorie analytique de M. *Ardant* est la seule qui, jusqu'à présent, ait été établie sur des principes en harmonie avec la science et la réalité ; elle peut donc nous servir de guide, de moyen exact de comparaison pour apprécier la valeur réelle des formules généralement adoptées, et le degré de stabilité qu'elles donnent aux constructions.

De nombreuses tentatives ont été faites pour résoudre expérimentalement le problème de la poussée des terres ; mais les appareils employés successivement par MM. *Gauthey*, *Mayniel*, *Martony*, etc., n'étaient pas assez parfaits pour que l'on parvînt à éviter les erreurs d'observation.

(1) *Mayniel*. Traité de la poussée des terres.

La précision des méthodes expérimentales suivies par M. *Audé* a permis enfin d'éclairer l'un des points les plus obscurs de la question, celui qui est relatif à l'influence importante du frottement des terres le long de parois d'appui mobiles par glissement ou par rotation.

L'on peut tirer des expériences de M. *Audé* les conclusions suivantes :

1° le coefficient du frottement qui se développe à la surface d'un plan solide pressé par un massif de terres est le même, que ce plan soit mobile par glissement ou par rotation autour de l'une de ses arêtes.

2° ce coefficient n'est pas nul, ni égal à celui du frottement des terres sur elles-mêmes ; il est toujours moindre que ce dernier, et décroît non-seulement à mesure que la fluidité du remblai augmente, mais encore lorsque, le talus naturel des terres restant le même, la grosseur des grains vient à diminuer.

3° pour tous les cas où la paroi de retenue BH a été assujettie à passer par l'axe de rotation, le frottement est resté le même, dans l'hypothèse du renversement autour de l'arête extérieure, quelles qu'aient été l'inclinaison du plan d'appui BD et celle du plan supérieur des terres, que le plan arasé de niveau ait été ou non compris entre deux murs verticaux parallèles, et que le remblai appuyé contre un plan vertical ait été ou non surmonté d'une surcharge.

4° dans l'hypothèse de la rotation autour de l'arête extérieure, l'angle $\varphi'$ qui mesure le frottement a donné par expérience :

tang. $\varphi' = 0{,}50$ pour le *gros sable sec* ;
tang. $\varphi' = 0{,}257$ pour le *sable extra-fin sec;*
tang. $\varphi' = 0{,}065$ pour du *mortier plus coulant encore.*

Ces valeurs se vérifient lorsqu'on applique aux expériences de M. *Audé* la théorie de MM. *Poncelet* et *Ardant.*

De la comparaison des valeurs de tang. $\varphi'$ relatives au sable gros et au sable extra-fin, on conclut le 2°.

5° D'après les expériences faites sur des remblais sans cohésion agissant contre des plans verticaux et terminés horizontalement à leur partie supérieure, les intensités de la poussée horizontale ainsi obtenue ne sont, pour le gros sable, que les 0,81 de celles que l'on trouverait par la formule de MM. *De Prony* et *Français*, formule qui, sous une autre forme, revient à celle de *Coulomb*, lorsqu'on néglige

le frottement des terres contre la maçonnerie. Cette différence doit donc être attribuée à l'influence de ce frottement. Elle disparaît en effet presque entièrement quand on a recours, soit à la formule plus générale où *Coulomb* tient compte de cette influence, soit à la formule de M. *Ardant* ou aux méthodes graphiques de M. *Poncelet*. La différence trouvée pour du sable extra-fin s'est élevée à 0,88.

6° Pour une même position du plan d'appui BH (fig. 16), quelle que soit l'inclinaison de ce dernier, l'intensité de la résistance qui s'oppose au renversement de ce plan est indépendante de la position de l'axe de rotation.

C'est donc à tort que M. *Audé* a cru pouvoir admettre que le frottement des terres sur la paroi augmente avec son bras de levier.

7° Il y a accord complet entre l'expérience et la théorie de MM. *Ardant* et *Poncelet*, non-seulement pour $\varepsilon = o$ et pour MRH (fig. 17) horizontal, mais pour des positions quelconques de cette ligne et du plan d'appui BH, même dans le cas d'une surcharge.

Suivant quelques auteurs, l'épaisseur des murs de soutènement à la mer doit être déterminée d'après la considération relative aux alternatives différentes de pression résultant des marées. A mesure que l'eau s'élève contre le parement extérieur, elle tend à pénétrer, latéralement ou par-dessous, et même à travers la maçonnerie, derrière le revêtement; quand elle baisse, une partie de cette eau demeure retenue par les terres et augmente ainsi la poussée. Il en résulte que l'on peut déduire l'épaisseur des soutènements de celle des bajoyers d'écluses à sas, dans lesquelles se présentent les mêmes variations de pression d'eau. Concluant d'après les observations faites sur environ 400 écluses, M. *Minard* admet la formule suivante :

$$x = 0{,}40\ \mathrm{H} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (p)$$

et les limites extrêmes trouvées pour le rapport $\frac{x}{\mathrm{H}}$ ont été 0,28 et 0,50.

De nombreuses observations faites sur des murs de réservoirs prouvent qu'il est difficile d'obtenir une imperméabilité absolue, surtout dans les premiers temps. Cependant à la longue les suintements finissent par disparaître. Cette considération de la perméabilité est sans doute assez importante pour qu'on y ait égard dans la détermina-

tion des épaisseurs des murs de soutènement; mais les expériences de M. *Audé* et l'étendue même des limites observées par M. *Minard* prouvent bien la nécessité de tenir compte, avant tout, dans la théorie comme dans la pratique, de la nature des terres et des maçonneries.

La formule ($p$) ne nous paraît donc pas acceptable comme règle générale.

Nous avons vu que la formule ordinaire :

$$e = 0{,}27\ H$$

comparée aux formules de M. *Ardant*, donne une stabilité qui est 1,636 fois plus forte que celle de l'équilibre. Ce surcroît de stabilité s'élèverait à environ 2,40 par la formule de M. *Minard*. Or, une telle différence est par trop considérable pour l'admettre gratuitement; devant un pareil coefficient, l'influence de la formule s'effacerait, et l'empirisme seul déterminerait en réalité les épaisseurs cherchées.

Nous adopterons donc comme formules générales les relations ($z$) et ($z'$), dans lesquelles $\delta$ recevra une valeur variable entre 1,80 et 1,50 selon que les circonstances de perméabilité et de cohésion seront plus ou moins défavorables.

## DISCUSSION DU PROFIL.

Afin d'augmenter le moment de stabilité du mur, on construit souvent des contre-forts à l'intérieur ; ceux-ci ont en outre l'avantage de diviser le prisme de plus grande poussée des terres, et parfois aussi d'empêcher la continuité des filtrations le long du revêtement. Quant à l'économie réalisée par l'emploi des contre-forts, elle est insignifiante, sauf le cas où ils sont exécutés en pierres sèches dans une région où la pierre à moellon est abondante et à bas prix.

Les contre-forts étaient employés presque généralement dans les XVI^e^ et XVII^e^ siècles. Actuellement les Français n'en font plus grand usage, mais les Anglais et les Hollandais les appliquent encore fréquemment; chez ces derniers, ils sont employés plutôt contre les filtrations continues que par motif d'économie, quoique en réalité la maçonnerie y soit très-coûteuse; leurs contre-forts en effet sont presque toujours minces, très-saillants et très-espacés.

Lorsqu'ils sont maçonnés avec le parement, pour déterminer l'épaisseur $x$ de celui-ci, on calcule séparément le moment de stabilité de la partie du mur qui correspond à un contre-fort, en le considérant comme faisant partie du revêtement, et le moment de la partie comprise entre deux contre-forts; on ajoute ces deux moments, et on égale leur somme au moment de la poussée calculée pour la longueur de prisme correspondant à l'intervalle compris entre deux contre-forts.

Si les contre-forts sont indépendants du mur, comme ceux en pierres sèches, on calcule le moment de stabilité, comme dans le cas précédent, mais sans avoir égard aux contre-forts, et on l'égale au moment de la poussée pris pour l'intervalle compris entre deux d'entre eux. Ce genre de contre-forts n'a pour objet que de rompre le prisme de plus grande poussée.

Cette méthode de calcul suppose des contre-forts assez longs en queue pour atteindre ce prisme. Dans le cas contraire, il faut tenir compte de la poussée qui a lieu contre le contre-fort par la partie du prisme non atteinte.

Le parement intérieur offre un profil très-variable ; on le construit avec retraites, en talus incliné vers l'extérieur, verticalement, ou même en surplomb sur les terres. Chacun de ces parements présente des avantages suivant les circonstances et les localités.

Lorsque le prix de la maçonnerie est élevé et que l'on fonde sans épuisements, l'on peut diminuer le cube du mur en élevant le talus par retraites puisqu'il n'y a aucun inconvénient à élargir l'empatement des fondations. Dans le cas opposé, il est préférable de faire le parement vertical. L'on emploie rarement les talus en surplomb; on les a utilisés quelquefois dans les localités où le prix de la maçonnerie est élevé, comme en Hollande, et dans des terrains traversés par de nombreuses sources; le but était donc de réaliser une économie et de diminuer les épuisements. Cependant, il faut remarquer dans ce genre de revêtement, que, si la tendance à la rotation autour de l'arête extérieure est notablement diminuée, la chance de glissement est augmentée par l'action de la partie en surplomb, car elle accroît la poussée des terres en les comprimant. Le mur tend à tourner dans le milieu dès que son pied est chassé vers l'eau.

Lorsque la hauteur est assez grande, il peut être avantageux d'em-

ployer des contre-forts avec voûtes en décharge. Ce système a été utilisé surtout pour les murs de quais et de bassins; outre l'économie importante qu'il permet de réaliser, il offre l'avantage de supporter le parement supérieur ainsi que les surcharges provenant des matériaux ou marchandises déposés plus ou moins près des navires amarrés.

Les murs de soutènement s'établissent généralement avec un certain fruit à leur parement extérieur. Lorsqu'ils doivent permettre aux navires d'accoster, comme dans les quais, les avant-ports, les bassins, ils exigent un profil tout particulier.

Afin que les bâtiments puissent accoster le plus près possible, il est nécessaire de réduire le fruit à son minimum. C'est pour satisfaire à cette condition, en même temps que pour accroître la résistance à la poussée des terres, que les Anglais donnent souvent au parement de leurs murs de quai la forme d'un arc légèrement concave vers l'extérieur et terminé au sommet par une partie verticale. En outre, ils inclinent les plans des assises normalement à la courbe, de sorte que les fondations se relèvent du côté de l'eau (fig. 18).

Ce profil offre deux avantages : 1° il augmente le moment de stabilité autour du point A avec un minimum de maçonnerie; 2° il accroît la cohésion du mur et sa résistance à la poussée horizontale, les pierres formant voussoirs, et étant par suite, comme dans une voûte, solidaires du haut en bas.

D'un autre côté, il présente l'inconvénient d'une construction difficile; les pilots inclinés se battent avec peine, sont moins résistants et tendent à glisser par le pied. Il en résulte aussi une grande sujétion dans la taille des pierres.

Pour des musoirs, des môles, etc., exposés à toute l'action de la pleine mer, l'on peut augmenter la courbure inférieure de façon à la terminer au pied par une pente à 45° environ; le point A dépasse alors de plusieurs mètres l'aplomb du sommet B. Ce profil est excellent, surtout si le pied A se trouve au-dessus des basses mers, c'est-à-dire exposé complétement au ressac des vagues et situé dans le rayon d'action de ces dernières. En effet, le choc direct et celui du ressac se décomposent, et les lames de retour qui descendent le long du plan incliné viennent encore contribuer à affaiblir la force vive de celles qui arrivent.

Quant aux murs de quais, de bassins et autres qui ne sont pas exposés à l'action des vagues quoique soumis à celle des marées, l'on se contente parfois d'établir à leur pied une rysberme ou un simple talus du terrain naturel, si ce dernier n'est pas de nature à pouvoir endommager la carène des navires. C'est ainsi qu'aux anciens bassins d'Anvers, on s'est dispensé de commencer les nettes maçonneries au niveau du fond; ayant assuré le pied du mur par une file de palplanches jointives, on a établi la construction sur le sommet d'un talus ayant environ trois de base.

Comme le prix de la pierre de taille est généralement élevé, on la réserve pour certaines parties spéciales dans les constructions maritimes, et entre autres pour les parements. Dans ces derniers, les pierres doivent être reliées entre elles, surtout si elles ne sont pas de fortes dimensions.

Les pierres de parement s'encastrent par chevrons (fig. 19) ou à queue d'aronde; on se sert aussi de petites pierres très-dures et très-résistantes ayant cette dernière forme (fig. 20) et qui sont spécialement destinées à remplacer le fer dans les endroits susceptibles d'être mouillés. L'on peut sans danger employer des agrafes en fer, lorsqu'on est certain qu'elles resteront noyées dans le mortier. M. *Minard* rapporte avoir vérifié le fait dans la démolition d'une ancienne écluse à Flessingue.

Les assises doivent aussi être reliées entre elles, soit par des goujons ordinaires, soit par des goujons à agrafes (fig. 21) qui relient en même temps les blocs entre eux, soit enfin par de petits dés en pierre dure engagés dans les deux assises contiguës (fig. 22).

Dans quelques constructions maritimes, aux môles de Sunderland entre autres, certaines parties du parement sont retenues par des poteaux fortement goujonnés dans des rainures. Ce système n'empêche pas les dégradations dans les parties adjacentes, mais il procure l'avantage de limiter les dégâts et de les rendre ainsi plus faciles à réparer.

# CHAPITRE HUITIÈME.

## MOLES, JETÉES, BRISE-LAMES ET MUSOIRS.

---

### DÉFINITIONS.

Les *môles* sont des ouvrages massifs destinés à faciliter l'entrée et la sortie des navires, à protéger un port, un bassin, ou une partie de rivage contre l'action directe des ondulations de la pleine mer.

Les *jetées* remplissent souvent les mêmes fonctions que les môles ; cependant, elles sont généralement à claire-voie et elles ont plus spécialement pour but de former chenal à l'entrée des ports, de guider les chasses, et parfois de permettre le halage des bâtiments et de favoriser le sauvetage. Avant l'emploi de remorqueurs à vapeur, elles servaient surtout à diriger l'entrée et la sortie des navires.

Les jetées et les môles s'appellent aussi *brise-lames;* cependant ce nom est réservé généralement pour les jetées ou épis en fascinages.

L'on appelle *musoirs* les extrémités antérieures des jetées, écluses, aqueducs, etc. Ces parties sont les plus exposées à être accostées par les bâtiments et à subir le choc violent des flots de la haute mer.

La composition de ces ouvrages est très-variable; on les construit en charpente, en maçonnerie, en fascinages et même en simple enrochement.

### BRISE-LAMES EN FASCINAGES.

Les brise-lames s'établissent dans une direction perpendiculaire à celle de la digue qu'ils doivent défendre. D'ordinaire, ils prennent naissance à la laisse des plus basses eaux, et se prolongent ensuite

vers la rive, où ils sont quelquefois enracinés jusqu'à ce que cette extrémité atteigne le niveau des vives eaux ordinaires.

Leur longueur varie de 25 à 300 mètres, leur largeur de 5 à 10 mètres et leur hauteur de 1 à 4 mètres. Leurs surfaces sont convexes et leurs têtes ou musoirs se terminent par une surface conique à base demi-circulaire. La jetée se construit sur le sable, tandis que son musoir est consolidé par une plate-forme coulée sous lest. Du côté exposé aux vents régnants, le sommet de l'angle formé par la jetée et la digue est protégé par une double couche de fascinages.

Le nombre des brise-lames nécessaire à la défense d'une partie de digue dépend de la longueur de cette partie; leur écartement varie aussi suivant la violence du courant ou des marées. Dans tous les cas, la jetée du milieu doit dépasser les autres en longueur et en hauteur; les suivantes diminuent progressivement, de manière à décrire ensemble et en tout sens une ligne plus ou moins courbe.

Les brise-lames se construisent : 1° en terre argileuse avec revêtement, soit en fascinages à tunes serrées ou lestées, soit en pierres de Tournai ou de Vilvorde; 2° en couches de fascinages et de décombres; 3° en fascinages seulement; 4° en couches alternatives de fascinages et de terre de schorre; 5° en matériaux divers.

1° *Brise-lames en terre glaise revêtue.*— Après avoir bien nivelé le noyau en terre argileuse, on le recouvre d'un paillassonnage, puis d'un revêtement à tunes serrées. Le contour en est bordé d'un *kieltuin* de 5 à 6 brins; les flancs, comme dans toute jetée construite sur le sable, doivent être enterrés sur un mètre au moins de profondeur (fig. 23).

Le brise-lames à tunes lestées est formé également d'un noyau en terre glaise, mais il n'est point enraciné; ses flancs sont protégés par une plate-forme de 4m00 de largeur sur 0m30 à 0m40 d'épaisseur au-dessous du sol, composée d'un grillage de saucissons, de trois couches de fascines, dont la dernière a deux fascines d'épaisseur, et de cinq saucissons; ceux-ci sont placés respectivement au-dessus des saucissons longitudinaux du grillage inférieur, et y sont retenus par des cordes de bitord (fig. 24).

De part et d'autre des saucissons règnent deux tunages lestés de pierres de Tournai ou de Vilvorde. L'intervalle compris entre les

deux fascinages qui protégent les flancs est remblayé en terre glaise et forme le corps du brise-lames ; on revêt ce noyau d'un paillasson de première classe, puis d'une couche de roseaux de $0^m05$ d'épaisseur et d'une assise de fascinages lestée de pierres d'une des localités précitées.

Les levées de fascines qui composent la couche de revêtement sont posées par retraites de $0^m25$ à $0^m35$, afin d'offrir une forte épaisseur. Les tunages en sont forts, et leur direction suit la longueur du brise-lames.

2° *En fascinages et décombres.* — Ce genre de brise-lames se construit de deux manières.

Dans le premier système, le corps de la jetée est encore en terre argileuse ; il est revêtu ensuite d'un paillasson de première classe, d'une assise de briques jointives et à plat, d'une couche de décombres de $0^m15$ à $0^m20$ d'épaisseur, et enfin d'un enrochement en pierres de Vilvorde ou de Tournai. Les flancs sont enracinés sur $0^m25$ de profondeur moyenne, et sont protégés par deux ou trois rangées de pierres placées de champ contre un fort tunage entouré d'un remblai en décombres ou en fragments de pierres (fig. 25).

Le corps du brise-lames, dans le second système, est formé de briquaillons au lieu de terre glaise. L'on commence par établir sur le sable un grillage en saucissons recroisés et espacés d'environ $1^m00$ ; on recouvre ce grillage de deux couches de fascines perpendiculaires entre elles, d'un noyau de briques concassées, d'une couche de fascines placées dans le sens de la jetée, d'une seconde assise placée transversalement et formant revêtement; et enfin, de rangées de saucissons, fixées de mètre en mètre à celles du grillage inférieur par des cordes de bitord, et longées de part et d'autre par de forts tunages dont les intervalles sont lestés de décombres ou de débris de pierres.

L'emploi de la terre argileuse est préférable à celui des briquaillons ; mais le premier genre ne peut être appliqué que là où la marée permet de construire à sec le brise-lames.

3° *En fascinages.* — La base du massif est formée d'une couche de fascines, placées transversalement et se recouvrant sur la moitié de leur longueur (fig. 26). Sur cette base, l'on établit deux tranches en fascinages composées, chacune, d'une couche de fascines longitudi-

nales et d'une couche transversale; l'épaisseur des couches transversales doit être maintenue plus forte dans l'axe de la jetée, afin d'obtenir une certaine courbure. Le revêtement supérieur est formé d'une assise de fascines disposées comme celles du lit inférieur.

De forts tunages, établis sur les couches transversales, relient entre elles toutes les parties de l'ouvrage; une grande partie de leurs piquets sont des *slieten* chevillés.

Les flancs du brise-lames sont défendus par des fascinages composés du prolongement des fascines inférieures, que l'on fixe par des tunages espacés d'un mètre, dont le septième est plus fort que les autres.

4° *En fascinages et terre de schorre.* — Ce brise-lames diffère du précédent en ce que les intervalles des tunes sont chargés de terre de schorre, au lieu de fascines, dans le corps de la jetée, et que les tunes du revêtement, qui sont ici plus espacées, sont lestées au moyen de décombres ou de pierres de Tournai ou de Vilvorde.

5° *En matériaux divers.* — Les jetées peuvent être formées de portions de chacun des genres que nous venons de décrire. Cependant, dans les endroits qui ne sont jamais mis à découvert par les marées, il est nécessaire d'avoir recours à un système de plates-formes en fascinages, coulées sous lest et superposées de façon à former par leurs retraites un talus à 45°; l'on peut aussi employer dans ce cas les fascinages à barbe ou les rysbermes. La plate-forme est formée d'un certain nombre de couches de fascines, comprises entre deux grillages en saucissons recroisés, reliés par des cordes de bitord, et surmontés de tunages. Les cases du grillage supérieur et de ses tunages sont destinées à recevoir le lest.

Le musoir et la portion contiguë du brise-lames étant construits sous l'eau au moyen de ces plates-formes, la partie suivante se composera, par exemple, de fascinages lestés de décombres si l'on est exposé aux attaques des tarets; la troisième partie, s'étendant jusqu'au niveau des marées hautes, s'exécutera suivant la première méthode, en fascinages à tunes serrées ou lestées; enfin, la dernière sera formée d'un simple perré en pierres de Vilvorde, ou même d'un paillasson, la paille résistant mieux à l'air que les fascinages.

## MOLES EN ENROCHEMENTS.

Les enrochements sont des massifs noyés, ou à peu près, destinés à servir de môles, de digues ou de fondations, et formés soit à pierres perdues naturelles ou en béton, soit par encoffrement.

*Enrochements à pierres perdues naturelles.* — Ce genre de massif est composé de pierres sèches jetées simplement dans l'eau, sans aucun apprêt.

Il est indispensable de connaître d'abord le profil que tend à prendre la partie plongée, afin de pouvoir déterminer l'empatement à donner.

L'expérience a démontré les faits suivants, quant aux talus; ils varient : 1° avec la profondeur de la mer ; 2° avec la grosseur des matériaux compris dans la zone d'action des vagues ; 3° avec la force de ces dernières.

Lorsque la mer est peu profonde, un enrochement, dont les pierres ne dépassent guère trois à quatre mètres cubes, tend à prendre le profil suivant dans la direction des vents dominants.

1° Du côté du large, et dans la partie basse en dessous de l'action des vagues, un talus assez roide variant de 1 1/2 à 2 de base (fig. 27).

2° Du même côté, mais dans la zone d'action de la mer, un talus très-variable, mais toujours fort doux, dans les limites de 6 à 11 de base.

3° Du côté intérieur, un talus de 1 à 2.

Tel est le profil que l'on a observé dans la plupart des enrochements à pierres perdues de dimensions moyennes, à Cette, à Cherbourg, à Plymouth, etc.

Ainsi, sur les côtes profondes, les talus inférieurs seuls peuvent être déterminés si les matériaux ne dépassent pas quelques mètres cubes.

Lorsque la mer a peu de profondeur, le ressac détruit la régularité des blocs ; dans ce cas, ce sont spécialement les talus des parties inférieures qui éprouvent le plus de bouleversements.

D'après ce qui précède, l'on voit qu'on peut généralement employer des moellons ordinaires pour les parties basses, et qu'il est indispen-

sable de jeter de très-forts blocs sur le talus supérieur exposé à la haute mer. Encore, ceux-ci finissent-ils par se déplacer, se briser ou s'ébrécher, et diminuer ainsi de volume. Comme l'inclinaison du talus varie avec la grosseur des pierres, il s'aplatit insensiblement

Généralement, dans le massif des môles, la couche inférieure est formée de pierres cubant de $0^{m3}03$ à $0^{m3}04$; la deuxième couche se compose de libages de $0^{m3}035$ à $0^{m3}055$; la troisième, de blocs de $0^{m3}500$ à $1^{m3}500$; et le couronnement, à partir du niveau des marées moyennes, est formé de blocs artificiels, dont le volume varie de 5 à 15 mètres cubes, et que l'on fabrique sur le rivage en maçonnerie de béton ordinaire ou de moellons à bain de mortier.

Les pierres employées pour enrochements doivent être dures, pesantes et de bonne qualité; tels sont les gneiss, les marbres, etc.

Ainsi que nous l'avons déjà vu, l'expérience a prouvé qu'un môle à blocs perdus, de 15 mètres cubes de volume chacun, acquiert en peu de temps une stabilité définitive complète; les talus se règlent d'eux-mêmes à 45° depuis le sommet jusqu'au fond de la mer.

Afin d'éviter des affouillements qu'il faudrait combler successivement, il faut verser les premières pierres sur toute la largeur de la base, et monter ainsi par couches. Cette manière de procéder est indispensable lorsque les enrochements reposent sur le sable à une profondeur moindre que celle qui limite l'agitation des vagues par les gros temps.

*Enrochements en blocs de béton.* — Ils s'exécutent comme les précédents, à pierres perdues. On donne ordinairement aux blocs, $3^{m}50$ de longueur sur $2^{m}00$ de largeur et $1^{m}50$ de hauteur.

Un enrochement exécuté à Alger, il y a une vingtaine d'années, avec des parallélipipèdes de 10 mètres cubes, a très-bien résisté sous des talus de 1 1/4 de base vers le large, et de 1 de base à l'intérieur. Les interstices entre les blocs donnaient une proportion de 1 à 2 entre le vide et le plein (1/3 du volume). Aussi, vers le sommet, le milieu de l'enrochement a-t-il été rempli au moyen de petits blocs, afin de pouvoir recouvrir le tout d'une couche générale de béton servant de naissance aux maçonneries supérieures.

A Marseille, Bastia, etc., l'on a adopté un système plus économique et tout aussi résistant. Il consiste à former, sur une certaine épais-

seur, un coffrage latéral en gros blocs de 12 à 15 mètres cubes, et à remplir le noyau avec des moellons ou des libages de toute dimension.

Le béton ordinaire est un mélange de mortier hydraulique et de pierres ou de briques cassées, de $0^m03$ à $0^m05$ de côté, dans des proportions variables selon la quantité de vides qui se forment entre les pierres, et suivant la dureté et l'énergie de prise dont on a besoin pour l'exécution du travail. Dans certaines localités, l'on remplace avec avantage les pierres cassées par des cailloux plus ou moins ronds, de la grosseur d'un œuf au maximum.

Il résulte d'un grand nombre d'expériences que dans un mètre cube apparent de débris de pierres ou de briquaillons, le vide est de 46 pour cent, et qu'il n'est que de 38 dans un mètre cube de cailloux. Pour obtenir un béton plein, sans aucun vide, et propre à la construction des enrochements qui doivent résister à la pression de l'eau, il est indispensable de porter la quantité de mortier aux 5/4 des vides par mètre cube. Pour les parties supérieures non exposées à la pression et au clapotement des vagues, il n'est pas nécessaire que le béton soit imperméable; il suffit qu'il soit incompressible et qu'il résiste à la rupture, et dès lors le volume du mortier peut être égal à celui des vides des cailloux ou des débris de pierres.

Dans la confection des blocs artificiels, le béton se jette directement avec la griffe et la pelle dans l'encaissement qui sert de moule, en ayant soin de le régaler par couches horizontales de $0^m20$ à $0^m25$, afin de lui donner l'homogénéité nécessaire pour qu'il soit imperméable. Il faut aussi damer chaque couche avec des pilons en bois ou en fonte, dans le but de chasser le mortier dans les vides, et de faire prendre aux pierres une position stable. A la reprise du travail, il faut prendre la précaution de nettoyer la surface de la dernière couche si elle a eu le temps de sécher, et y appliquer un enduit de mortier frais avant de la couvrir d'une nouvelle tranche de béton. Si l'on est forcé d'interrompre l'exécution d'une couche, il est prudent de la terminer en crémaillère, afin de mieux raccorder les parties.

*Enrochements par encoffrement ou encaissement.* — Ce sont des massifs retenus par des coffrages latéraux en charpente, et composés de blocs en pierre ou en béton, ou bien encore de béton coulé.

Les cônes de la digue de Cherbourg, dus à *De Cessart,* offrent un

exemple remarquable de ce genre de construction, qui est principalement applicable aux môles et aux jetées.

Dans la Méditerranée, beaucoup de môles ont été coulés en béton par encoffrement sur un terrain rocheux ; ce système a été utilisé aussi pour les fondations des môles du port militaire de Cherbourg. Son emploi est très-limité aujourd'hui, les tarets s'étant propagés sur presque toutes les côtes de l'Europe. Cependant, dans ces dernières années, l'on a déjà essayé de remplacer par de la tôle les bois qui composent la charpente de l'encaissement.

Il ne faut pas confondre la méthode en question avec celle dite par *caisson ;* dans celle-ci, la fondation ou l'enrochement se construit sur le fond même du caisson qui s'enfonce peu à peu jusque sur le sol par le poids même de la maçonnerie ; l'enrochement par encaissement consiste à former, autour de l'emplacement déterminé, une enceinte de pieux jointifs ou de pilots et palplanches, à draguer cette enceinte, si le terrain est mou ou vaseux, jusqu'à ce qu'on atteigne un fond suffisamment résistant, et à remplir l'encaissement, soit au moyen de blocs en pierre ou en béton, soit par du béton coulé. Dans ce dernier cas, l'on se contente souvent de former une enceinte perimétrique plus ou moins épaisse en béton, et on remplit ensuite l'intérieur avec des matériaux quelconques ; ce genre de construction ne peut être employé que pour des profondeurs qui ne dépassent pas 5 à 6 mètres.

Si le fond est composé d'un roc dans lequel il est impossible d'enfoncer les pilots, on les garnit de sabots en fer afin de pouvoir leur donner une légère fiche, et on cherche à les soutenir par l'un ou l'autre procédé. On a aussi souvent recours à un caisson sans fond, construit sur chantier, et dont les parois sont formées de poteaux montants et de fortes palplanches, le tout maintenu par plusieurs cours d'entretoises horizontales. Le caisson étant transporté sur l'emplacement de la jetée, on le fait échouer en le chargeant, puis on coule le béton.

Quant à l'épaisseur totale à donner aux môles en béton coulé, c'est-à-dire à l'intervalle entre les parois de l'encoffrement, on doit, d'après *Bélidor,* donner moitié de la profondeur de l'eau, si l'on est dans l'intérieur d'un port, ou les 2/3 si l'on est au large. Mais cette règle doit être subordonnée évidemment aux dimensions des maçonneries qu'on peut avoir à élever sur l'enrochement.

L'immersion du béton s'opère de différentes manières suivant que l'eau est plus ou moins profonde.

Quand la profondeur ne dépasse pas 2 mètres, le béton s'immerge par la méthode dite à *talus coulant,* qui consiste à construire le massif par bandes inclinées coulées successivement. On commence par amorcer la digue ou le môle; à cet effet, l'on décharge de la rive, ou l'on fait descendre au moyen d'une caisse en planches, une certaine quantité de béton, que l'on presse à la dame de façon à le faire glisser doucement sous l'eau en formant son talus naturel. On charge alors successivement la crête de ce talus, sur lequel on facilite le glissement des charges de béton au moyen de la pelle; et on fait ainsi avancer progressivement le talus et le massif en même temps qu'on tasse ce dernier à la dame plate au fur et à mesure de l'avancement du travail.

Cette méthode ne peut guère s'employer à la mer, les profondeurs de l'eau y étant parfois considérables. Dans ce cas, l'on emploie le *coulage par caissées.* L'immersion s'opère au moyen de trémies, ou mieux de caisses prismatiques ou demi-cylindriques, chargées de béton et descendues par un treuil jusqu'à $0^m30$ ou $0^m40$ du fond, où on les vide, soit en les faisant basculer, soit en ouvrant une soupape; ou bien, par tout autre moyen qui permette à la caisse de s'ouvrir par le dessous.

La trémie (fig. 28) se compose d'une gaîne en planches, plus ou moins longue et solide suivant la profondeur de l'eau, et glissant à frottement sur deux poutrelles ou coulisses maintenues par des échafaudages. La gueule de la trémie a d'ordinaire $0^m40$ de côté.

L'on a généralement abandonné le mode d'immersion par la trémie, à cause des nombreux inconvénients qu'elle présente, et qui sont particulièrement : d'être d'une manœuvre très-difficile quand la charge est forte; de causer, par le grand frottement sur les coulisses, le déversement des pilots d'échafaudage; enfin, de ne donner que des jets irréguliers, inégaux, qui empêchent d'obtenir un massif homogène. Certaines circonstances fortuites, et souvent le balancement que les ouvriers impriment avec intention à la trémie, produisent des à-coup dans la descente, déjà très-peu uniforme, du béton, et ajoutent ainsi une force vive à la pression constante de la colonne. Cette pression, de son côté, pousse les jets à une grande distance de l'action verticale

de la machine, distance qui dépend à la fois de la fermeté du béton et de la hauteur de la trémie et qui est presque toujours supérieure à cette hauteur même pour du béton corroyé très-ferme.

Ainsi, loin de donner un massif compacte et homogène, le béton coulé par la trémie s'étend en avant de la machine par couches d'une faible inclinaison, très-minces, dont les extrémités surtout arrivent divisées et privées de la force d'agrégation qui pourrait leur faire offrir de la résistance à l'action des vases. Les coulées se faisant par jets inégaux, les plus forts constituent les crêtes des ondulations ainsi formées, et ces arêtes facilitent les dépôts vaseux dans les sillons. La partie la plus avancée des talus de chaque couche est celle qui doit être le plus particulièrement viciée, puisqu'elle a la plus faible inclinaison et qu'elle offre en même temps le moins de résistance au mélange des vases.

L'on a essayé parfois d'employer des paniers pour couler le béton; mais on a renoncé aussi à cette méthode à cause de ses graves inconvénients, dont les principaux sont la déformation et la destruction rapides des paniers, et la division extrême du béton au moment où on le déverse.

A ces procédés, l'on a substitué l'emploi de caisses très-variées de formes et de dimensions, que l'on a mises en action de diverses manières, soit sur des radeaux, soit sur des échafaudages.

Dans l'une de ces méthodes d'immersion, le radeau (fig. 29) était composé de trois parties *a,b,c,* laissant entre elles deux intervalles de $0^{m}80$ de largeur. Celles-ci étaient soutenues par des tonneaux, et reliées à leurs extrémités par deux traverses à chacune desquelles se trouvaient quatre cordes, qu'on tendait dans toutes les positions du radeau, en les attachant au chapeau des pilots d'enceinte.

Dans chacun des intervalles était manœuvrée, au moyen d'un treuil monté sur un petit chariot, une caisse prismatique suspendue à des tourillons placés un peu au-dessus de l'axe de gravité (fig. 30). La longueur de la caisse était de 1 mètre dans œuvre; elle avait $0^{m}25$ de hauteur, $0^{m}30$ de largeur au fond, et $0^{m}50$ à l'ouverture supérieure, et contenait un décimètre cube de béton. Ces dimensions rendaient facile le calcul du béton immergé, mais la caisse était un peu pesante, et il fallait un ouvrier adroit et fort pour la manœuvrer.

La forme rectangulaire du radeau qui ne pouvait se mouvoir que parallèlement à lui-même, celle des intervalles et de la caisse, étaient autant de garanties de la régularité et de la continuité de l'opération.

Le béton était porté à dos d'homme, et versé dans la caisse au moyen de l'outil à porter nommé *oiseau;* celui-ci était préférable, dans ce cas, à la brouette, tant pour la facilité du déchargement dans la caisse que pour la rapidité dans la marche de l'ouvrage ; l'on pouvait aussi par là se servir d'appontements ou d'échafaudages très-légers et faciles à mouvoir, tandis que le brouettage en eût exigé de très-solides.

Un fort manœuvre, assisté d'un jeune garçon, descendait au fond, par le moyen du treuil, la caisse chargée ; dès qu'elle touchait, il la remontait d'une quantité suffisante pour la faire tourner ; son aide la faisait alors basculer au moyen d'une corde, et le béton se séparait sans secousse de la caisse, au fond de laquelle on avait percé des trous qu'on avait soin de déboucher de temps en temps. Ces trous facilitaient la séparation en faisant agir la pression de l'eau.

Les fonctions de l'aide-manœuvre comprenaient encore une opération importante, celle de remanier avec un pilon le béton au fur et à mesure qu'on le versait dans la caisse, afin de lui donner une consistance homogène en faisant *revenir* les parties desséchées.

Le coulage s'exécutait par couches, en ayant soin d'enlever simultanément les vases solides et fluides à la drague et au râteau. La caisse manœuvrant dans la première coulisse versait la première couche de $0^{m}50$ d'épaisseur ; celle de la seconde coulisse versait la seconde couche à recouvrement sur la première Un ouvrier intelligent pressait avec une dame plate le béton versé, et l'on marquait sur le manche de la dame la hauteur de l'eau du jour au-dessus de la couche, afin que cet ouvrier dirigeât le travail d'une façon régulière.

En avant du radeau pour couler le béton se trouvait, en *d,e,* celui des dévaseurs occupés à enlever à la drague les parties sablonneuses et vaseuses tenues en suspension par l'eau pendant le draguage, et qui, en se déposant ensuite au fond de la fouille, formaient sur toute son étendue une couche d'épaisseur variable. Ces vases sont d'autant plus abondantes que la hauteur d'eau est plus grande. Si le draguage

a été long et considérable, elles prennent de la consistance, et peuvent être enlevées à la drague. Outre ces vases plus ou moins solides, il se produit au fond de la fouille des dépôts successifs qui proviennent à la fois de la vase tenue en suspension dans l'eau, par suite de son agitation continue, et du délavement du béton. L'état de mollesse de ces dépôts les rend imperceptibles à la sonde ; leur enlèvement est cependant d'une importance capitale, sinon, lorsqu'on coule le béton, elles se soulèvent et se mélangent avec lui. Quel que soit le mode d'immersion, le béton arrive toujours plus ou moins mou et divisé au fond de la fouille, et le massif s'exécute par couches d'une faible épaisseur ; nous avons vu que la trémie donne en ce genre les plus mauvais résultats. La surface des couches successives présente des inégalités, et les vases molles, en se déposant, sont entraînées par le batillage de l'eau dans les parties creuses, où elles se fixent et ont le temps de s'agglomérer, de prendre consistance avant l'immersion de la couche suivante, qui doit les presser, et dont le poids n'a guère d'autre effet que de mélanger plus intimement les vases avec le béton dont elles détruisent l'homogénéité. Des flaques sans résistance interposées entre des couches de béton dur permettent à l'eau de s'infiltrer à travers la fondation, et les résultats désastreux qui en sont la conséquence sont attribués la plupart du temps à l'impuissance des bétons au lieu d'être rejetés sur la négligence apportée dans la construction même.

Dans le cas particulier que nous citons comme exemple, les précautions nécessaires avaient été prises pour obtenir un massif parfaitement homogène et compacte. Ainsi, deux ouvriers placés en *c* et *d*, et armés d'une sorte de râteau ou balai en lames de tôle (fig. 31), à long manche, nettoyaient en avant du béton le terrain jusqu'au vif, et chassaient sur les côtés, en dehors des pilots d'enceinte et dans une rigole de $0^m30$ de profondeur qui avait été ménagée, les vases molles provenant soit du draguage soit du béton. Ce balai ou râteau était formé de feuilles de tôle de $0^m20$ de hauteur, enchâssées entre deux tringles de fer par leur partie supérieure, et montées de façon que leur partie inférieure eût assez de flexibilité pour agir comme balai.

Dans cette méthode, le béton étant coulé par couches contiguës, il était possible de le comprimer au fur et à mesure de l'immersion, en obligeant simultanément les parties vaseuses à dégorger latéralement

et à couler jusqu'au pied, d'où elles étaient conduites dans les rigoles latérales au moyen du balai en tôle.

Le procédé suivant a été employé pour la fondation des môles du port militaire de Cherbourg, après que l'on eût vainement essayé de se servir de trémies.

Les caisses destinées à recevoir le béton étaient ouvertes sur une de leurs parois verticales, et saisies aux quatre angles supérieurs par des chaînettes, dont deux, *r*, étaient fixées invariablement et les deux autres étaient passées dans deux crochets *m* (fig. 32). Les quatre chaînettes étaient réunies à une chaîne plus forte *n*, enroulée sur un treuil, et les crochets *m* disposés de façon à laisser échapper leurs chaînettes, lorsque la chaîne principale *n* n'était plus tendue. De cette manière, lorsque la caisse touchait le fond, il suffisait de laisser descendre encore l'ensemble des chaînes, puis de le remonter; les extrémités *m* quittaient les crochets et les chaînettes fixes *r* seules relevaient la caisse et renversaient le béton qu'elle contenait.

Ce procédé n'a guère été utilisé; l'emploi des caisses demi-cylindriques a été jugé préférable.

La caisse demi-cylindrique, généralement adoptée, cube $0^{m3}50$ à $0^{m3}60$. On la descend en maintenant son axe horizontalement, et l'ouverture se fait par la partie cylindrique. La caisse doit être parfaitement remplie, et la surface du béton bien égalisée et lissée à la pelle afin d'empêcher la pénétration de l'eau. Les caissées sont descendues ainsi les unes sur les autres jusqu'à ce que le tas ait la hauteur que l'on veut donner à la première couche horizontale, et qui varie de $0^{m}75$ à $1^{m}00$. Quand un tas est formé, on avance le treuil sur l'emplacement du tas suivant; et on continue de la sorte par zones de tas, en damant toujours le remblai avec un pilon à long manche. La première couche de béton étant à hauteur, on construit la deuxième, puis les suivantes, de la même manière.

Ainsi que nous l'avons dit, la laitance, composée de chaux et de sable ou de vase, se produit toujours en quantité variable selon les précautions prises pendant l'immersion et suivant la méthode employée. Elle se dépose entre les bases des cônes formant les sommets des tas, d'où il est indispensable de l'enlever à mesure qu'elle se produit; il faut surtout la faire disparaître avant de commencer une nouvelle

couche, sinon elle formerait une tranche sans consistance et très-perméable dans le massif.

Au lieu de régler la construction par couches horizontales de caissées, l'on peut, pour faciliter l'écoulement de la laitance vers un même point, immerger le béton par gradins horizontaux allongés, inscrits dans un talus idéal de 1/6 à 1/7 d'inclinaison.

L'on peut aussi, dans les grandes profondeurs d'eau, employer les caissées pour opérer un *coulage en talus,* qui consiste, ainsi que nous l'avons vu, à monter des bandes successives sur toute la hauteur, en les appliquant les unes contre les autres. Un talus de 1 1/2 à 2 de base est suffisant pour éviter les éboulements, surtout si l'on a soin d'employer le béton aussi ferme que possible, et de ne pas trop le comprimer pendant la construction.

Des diverses observations que nous avons présentées sur l'influence pernicieuse des vases, et sur la manière dont elle s'exerce, l'on peut conclure aisément les conditions essentielles à remplir pour arriver à former sous l'eau un massif homogène et compacte.

La première condition est de nettoyer le sol jusqu'au vif. A cet effet, il faut enlever d'abord à la drague les vases solides; puis, pendant toute la durée de l'immersion, expulser devant le béton les vases liquides au moyen du balai en tôle et des rigoles.

Il faut ensuite prévenir le mélange avec le béton que l'on immerge des vases tenues en suspension dans l'eau et qui se déposent continuellement. Comme elles sont insaisissables par les instruments, on peut diriger contre elles l'action même de l'eau contenue dans la fouille. Ainsi l'on agitera l'eau, surtout après un repos, et l'on aura soin de presser légèrement avec une dame plate les portions successives que l'on immergera. De là résulte la nécessité de couler le béton d'une manière continue et régulière, en donnant aux couches successives, c'est-à-dire aux talus, la plus grande inclinaison possible, afin que les parties vaseuses soient facilement entraînées par le batillage de l'eau, jusqu'à leur pied, d'où elles seront balayées dans les rigoles latérales.

Le massif doit donc s'avancer par couches continues, ne présenter jamais que la surface supérieure et le talus le plus raide possible. Cette dernière condition exige que le béton soit corroyé bien ferme. Il est donc préférable de le fabriquer sans eau, à l'aide de pilons avec de

la chaux éteinte plutôt qu'à la griffe ou au rabot et avec de la chaux vive.

L'on peut conclure aussi des considérations précédentes que la méthode d'immersion par couches *générales* minces, superposées horizontalement, doit produire très-rarement un massif homogène. Ce procédé permet, il est vrai, de tasser le béton par parties de médiocre épaisseur, mais les vases abondantes qui se déposent entre les couches doivent s'opposer à leur liaison.

## JETÉES ET MUSOIRS EN CHARPENTE.

Les jetées en charpente se construisent à *claire-voie* ou en *encoffrement ;* dans le premier cas, on les appelle aussi *estacades*. Quelquefois l'encoffrement n'existe que dans la partie basse ; d'autres fois la charpente à claire-voie s'élève à partir du niveau des vives eaux d'équinoxe, et la partie inférieure est en enrochement.

En général, la partie basse des jetées en charpente est un massif qui s'élève plus ou moins et qui est en enrochement ou en fascinages, et parfois composé de ces deux espèces de matériaux. Il s'étend en talus doux à l'extérieur et à l'intérieur, et forme rysberme défensive au pied de la jetée. La surface en est pavée, dallée ou revêtue d'un perré en moellons (fig. 33).

Les encoffrements sont composés de madriers jointifs, courant horizontalement, et appuyés, soit intérieurement soit extérieurement, contre des poteaux. Le coffre est rempli de pierres sèches, galets, terre, sable, etc. (fig. 34).

La charpente des jetées à claire-voie se compose de fermes de *hautes* et *basses palées*, d'autant plus rapprochées que la mer est plus profonde et plus à craindre par les gros temps.

Chaque ferme présente la forme d'un trapèze, dont les talus varient de 1/7 à 1/3. Elle se compose de quelques poteaux réunis par plusieurs doubles moises horizontales ; des jambes de force embrassées par des moises consolident les poteaux. Des cours de ventrières, de liernes et de moises boulonnées relient les fermes dans la longueur.

Toutes les pièces s'assemblent avec un simple embrèvement et des boulons à écrou ou à clavette ; l'on sait par expérience que l'ébranlement continu provenant des vagues occasionne un frottement qui use

les assemblages, les disloque et ruine ainsi la solidité de la construction. Au moyen de boulons, au contraire, il est facile de resserrer les pièces; et les embrèvements conservent ainsi toute leur résistance, tout en facilitant le renouvellement des parties.

Dans les encoffrements pour jetées, musoirs, digues, etc., il paraît indifférent, au point de vue de la solidité, de placer à l'intérieur ou à l'extérieur les bordages en madriers horizontaux. Placés intérieurement, ils résistent mieux à la poussée du remplissage ou des terres; mais les réparations en sont difficiles et la saillie des pilots peut être nuisible aux navires. Les bordages extérieurs sont d'un entretien facile et forment une surface moins dangereuse à accoster. Cependant, comme il est souvent indispensable de garantir le bordage contre la poussée intérieure, surtout à cause des poussées variables de l'eau produites par les marées, on place alors le revêtement du côté des terres, en ajoutant vers la mer des fourrures ou des cours de liernes qui garantissent la charpente contre le choc des bâtiments poussés à la côte.

Il est préférable de composer les fermes d'une haute et d'une basse palée plutôt que d'employer des pilots d'une seule pièce pour atteindre le plancher supérieur. Ce dernier cas est, du reste, rarement possible à cause de la fiche exigée par la nature du terrain. D'un autre côté, le battage des grands pilots est coûteux et difficile; l'alignement exige aussi plus de précautions. Toutes les pièces qui s'assemblent dans le bas des pilots ne peuvent être taillées et ajustées qu'à marée basse. L'on gagne en solidité en employant des pilots d'une seule pièce, mais il est aisé de consolider l'autre système d'une façon satisfaisante. Enfin, l'avantage précédent est minime et de fort peu de durée, tout en coûtant fort cher, car le bois est sujet à se détériorer plus ou moins rapidement par les vers ou par les alternatives de sécheresse et d'humidité, de sorte qu'il devient bientôt nécessaire de faire l'enture des pilots vers l'endroit où commencent d'ordinaire les palées hautes.

L'équarrissage des pilots varie de $0^m25$ à $0^m40$. Ils sont goudronnés complétement, à moins que les bois n'aient subi au préalable une des préparations que nous avons mentionnées.

Les moises supérieures soutiennent des poutrelles recouvertes d'un plancher en madriers de $0^m10$ à $0^m12$ d'épaisseur, espacés entre eux

de deux à trois centimètres pour l'écoulement de l'eau provenant des vagues par les gros temps. Les madriers sont boulonnés aux poutrelles ou reliés entre eux par deux cours de madriers latéraux qui les recouvrent et qui ont environ $0^m14$ de largeur sur $0^m10$ à $0^m11$ d'épaisseur ; la première méthode a été employée à la jetée d'Ostende; la seconde, à celle de Dunkerque.

Les jetées en charpente présentent l'avantage de rompre en partie la lame et d'une manière suffisante pour l'empêcher de se propager jusque dans l'intérieur du port ; leur construction est rapide et généralement économique. Mais leur entretien est coûteux ; elles ont aussi l'inconvénient de ne pas garantir tout à fait les navires des vagues, ni des courants de flot en travers du chenal; ces derniers sont parfois très-dangereux lorsque le chenal est formé de deux estacades, ou de jetées dont les parties pleines inférieures ne sont pas assez élevées pour arrêter ou briser ces courants.

Les musoirs en charpente ont généralement une forme arrondie, et se construisent comme les jetées. Lorsque le sol est affouillable, il est prudent d'en garantir le pied au moyen d'enrochements.

La description suivante se rapporte aux musoirs qui forment la tête du chenal d'accession à l'écluse maritime des nouveaux bassins d'Anvers. L'examen critique de cette construction est destiné à faire ressortir clairement l'action des poussées et des diverses résistances dont on doit tenir compte dans ce genre d'ouvrages, ainsi que les conséquences désastreuses auxquelles on s'expose par l'oubli des principes fondamentaux que nous avons développés dans ce chapitre et dans le précédent.

Le fond du chenal se trouvant à $3^m73$ au-dessous des marées basses ordinaires, il était indispensable de draguer jusqu'à cette profondeur l'aire comprise entre les musoirs.

Le terrain, dans ces parages, se compose de couches plus ou moins épaisses de sable, tourbe et gravier coquillier.

Le profil transversal des charpentes n'est pas uniforme sur tout le développement des musoirs. Dans les parties les plus exposées à l'action des courants et à l'accostage accidentel des navires, chaque ferme se compose de quatre pilots, espacés et disposés comme l'indique la coupe AB (fig. 37). Dans les autres parties, le nombre des pilots est réduit à trois (coupe CD).

Toutes les fermes, sans exception, sont espacées de 2m00 d'axe en axe, suivant la ligne des pilots de la file extérieure.

Des palplanches jointives sont battues, sur tout le développement, dans les intervalles de la ligne des pilots qui longe immédiatement le chenal et l'Escaut, dans chaque musoir. Pour les fermes les plus exposées, les palplanches sont enfoncées de 2m75 dans le terrain dragué. La fiche n'atteint que 2 mètres pour les fermes à trois pilots.

Derrière chacune de ces lignes de palplanches, il a été coulé du béton, formant un massif de 1m00 de largeur au sommet, et dont la crête se trouve à 0m50 au-dessus de la marée basse ordinaire. Ce massif repose sur une fondation en moellons bruts.

Les pilots de la file extérieure, qui forment en même temps les montants des musoirs, sont battus avec 4m00 de fiche dans le terrain dragué; la fiche des autres pilots n'est que de 3m00.

Dans les parties courbes, les chapeaux moisés qui relient entre eux les pilots de la file extérieure, de même que le chapeau du couronnement, sont formés de trois épaisseurs de madriers de 0m10 d'épaisseur, assemblés à chevilles ou gournables en chêne, comme dans les cintres à la Philibert de Lorme.

Les planches formant chaque épaisseur sont posées bout à bout, et leurs joints ont une direction tendant vers le centre de l'arc de cercle. Les joints d'une épaisseur ou rangée correspondent au tiers de la longueur des planches de la rangée immédiatement supérieure ou inférieure; ils sont combinés de façon qu'il ne s'en rencontre jamais deux sur une même verticale. Ces planches ont été sciées suivant les gabarits des courbes que décrit le tracé des musoirs, dans les parties auxquelles ces chapeaux correspondent.

Les bandes et étriers qui relient entre elles les diverses pièces de la charpente sont en fer forgé méplat de 0m07 sur 0m02. Les boulons ont un diamètre uniforme de 0m03.

La charpente des musoirs est formée des essences suivantes.

*A*. Sapin du Nord, dit de *Dantzig*.

1° Les pilots équarris de la file extérieure, ayant chacun 15m00 de longueur après le battage et le recepage de la tête, sur un équarrissage de 0m33 à 0m36 mesurés à 1m00 sous le gros bout.

2° Les madriers pour palplanches, en pièces de 0m15 d'épaisseur,

ayant 8m00 de longueur dans les parties qui correspondent aux fortes fermes, et 7m20 dans les autres endroits.

3° Une fraction des liernes, moises et bracons moisés.

*B*. Chêne équarri à vive arête.

1° Les chapeaux du couronnement et les chapeaux moisés.

2° Les bordages extérieurs en madriers de 0m05 à 0m06.

3° Les traverses entre les montants des pilots de la première file, en pièces de 0m30 sur 0m15.

4° Les traverses inférieures entre ces montants, en pièces de 0m30 sur 0m07.

*C*. Hêtre.

1° Les jambes de force arc-boutant les pilots de la deuxième file dans chaque ferme.

2° Une fraction des liernes, moises et bracons moisés.

3° Une partie des bordages intérieurs, en madriers de 0m10.

4° Le complément des mêmes bordages, en madriers de 0m15.

*D*. En bois rond simplement écorcé, sapin du pays ou hêtre, de 0m25 à 0m30 de diamètre moyen.

Tous les pilots autres que ceux mentionnés en A.

Les essences ont été ainsi mélangées, afin de pouvoir utiliser une partie de bois de chêne et de hêtre provenant d'une première entreprise faite d'après un projet qui donnait aux musoirs une résistance insuffisante, et qui fut abandonné au début de la construction pour être remplacé par le projet actuel.

Tous les bois en général ont été préparés à la créosote impure, d'après le procédé de M. *J. Bethel,* que nous avons décrit; cette préparation coûte 11 francs au mètre cube, bénéfice compris.

Les extrémités de chaque musoir sont raccordées avec les rives de l'Escaut par un *pakwerk* en fascinages, dont le sommet est élevé jusqu'au niveau des marées hautes ordinaires.

Ces *pakwerk* de soutènement ont 1m50 d'épaisseur en crête. Ils se composent de couches successives de fascines ayant le gros bout tourné vers le fleuve, et posées en retraite les unes sur les autres de manière à former un talus extérieur à 45° et un talus intérieur de un de base pour deux de hauteur.

Chaque couche de fascines est fixée à la précédente par trois lignes

de tunes de 0m12 à 0m15 de hauteur, espacées de 0m50. Les piquets sont distants de 0m35, et les intervalles entre les tunes sont remplis en gazons provenant des schorres de l'Escaut.

Le béton coulé derrière les palplanches est formé de :

4 ½ mortier ;

4 briquaillons, de 0m03 de côté ;

4 $\frac{7}{10}$ pierres concassées, de 0m03 de côté ;

le tout produisant dix parties de béton. Les pierres sont des carbonates calcaires de Tournai, Soignies, Lessines, etc.

Les moellons bruts des enrochements, qui soutiennent le pied des pilots et qui servent de fondation au béton, ont un volume minimum de 0m³008 sans qu'il puisse y avoir moins de 0m12 dans aucun sens.

Les fascines, piquets et clayons sont en chêne.

Plusieurs mouvements se sont produits, spécialement au musoir Nord, sous l'action du remblai en sable de mer exécuté derrière le bordage. Avant même que ce remblai fût complétement terminé, des écharpes moisées se sont rompues, et quelques pilots de rive se sont avancés de 0m,20 à 0m,30 vers le fleuve. Force fut de stater le travail, pour éviter de plus graves conséquences.

Les résultats précédents proviennent essentiellement de ce que les palées sont formées d'une seule pièce. Sous l'action alternative des marées et des remblais intérieurs, les pilots de rive, n'ayant reçu qu'une fiche insuffisante, tendent à prendre un mouvement de va-et-vient qui élargit peu à peu l'alvéole de leur pied, et leur permet ainsi de céder à la plus puissante des deux forces qui les sollicitent. Cette action est d'autant plus énergique qu'elle agit avec un bras de levier considérable.

Le mouvement aurait pu, il est vrai, être empêché si l'on avait eu soin de relier les pilots de rive à des points immuables situés en arrière. Malheureusement, une partie des écharpes était en bois de hêtre provenant de l'entreprise antérieure et dont la résistance s'était sensiblement altérée par un long séjour en plein air. D'un autre côté, la disposition adoptée augmentait encore la difficulté qui se présente naturellement lorsqu'on veut moiser sur des pilots ronds. Ces derniers, du reste, ne possédaient pas la stabilité nécessaire.

Plusieurs moyens s'offraient pour obvier aux inconvénients signalés ;

mais les plus efficaces auraient entraîné à des dépenses trop élevées. Il fallait évidemment s'efforcer d'arrêter le mouvement du pied et diminuer la pression du remblai.

Le premier résultat pouvait être obtenu d'une manière satisfaisante, au moyen d'un massif de béton coulé, de 2m,00 environ d'épaisseur, maintenu par une file de palplanches, et s'élevant à 0m,60 ou 0m,70 au-dessus du fond dragué; en lui donnant 1m,50 de largeur il n'aurait pu gêner l'accostage des navires.

Quant à la poussée intérieure, il était de toute nécessité de remplacer le sable par un massif doué d'une forte cohésion, tel qu'un *pakwerk* ou un remblai en décombres.

Le tout pouvait être complété par un supplément d'écharpes en chêne, solidement reliées à quelques nouveaux pilots ayant 5 à 6 mètres de fiche.

On s'est arrêté à l'emploi des décombres, sauf à relier convenablement le bordage à d'anciens pilots de l'entreprise précédente, et à quelques pilots supplémentaires convenablement enfoncés.

## JETÉES OU MOLES EN MAÇONNERIE.

Les jetées ou les môles en maçonnerie se construisent sur une fondation solidement établie, soit en enrochement ou en béton, soit sur plate-forme pilotée, avec enceinte de palplanches, et avec rysberme défensive en pierres ou en fascinages si le terrain est affouillable.

On construit aussi généralement en maçonnerie, sur une certaine hauteur, la partie des môles en enrochement qui dépasse les marées hautes.

Ici se présente une question importante : quel doit être le relief d'un môle au-dessus de la mer, et quelle forme doit affecter son profil?

Deux systèmes tout à fait différents, quant au relief et à la forme, ont été préconisés et employés; chacun d'eux présente à la fois des avantages et des inconvénients.

Dans le premier système, exécuté entre autres à Cherbourg, les maçonneries s'élèvent à quelques mètres au-dessus des hautes mers d'équinoxe, et présentent aux vagues un obstacle brusque, plus ou

moins abrupt suivant le fruit ou la courbure du parement. Ce genre de brise-lames empêche convenablement la transmission des ondulations jusque dans la rade ou le port, mais il est fatal à la solidité de la construction, par les chocs et les pressions considérables que les vagues exercent sur les parties supérieures; parfois même celles-ci sont battues en brèche par des blocs enlevés par les flots aux talus de l'enrochement et lancés avec violence contre les parements de la maçonnerie.

Dans le second système, le relief du môle est très-faible mais sa largeur est parfois considérable. Le massif est disposé en talus plus ou moins doux au-dessus des basses mers; les vagues n'étant plus arrêtées brusquement, y déferlent avec facilité; elles acquièrent, il est vrai, une grande vitesse horizontale, mais afin d'empêcher les dégradations on rend le parement du brise-lames aussi uni que possible au moyen d'un revêtement. Le sommet du *breakwater* de Plymouth, qui ne s'élève qu'à $0^m,60$ au-dessus des hautes mers de vive eau, a été disposé de cette façon, et son talus ouest, qui reçoit les lames du large, a été recouvert d'un parement, incliné au cinquième, formé de blocs de $0^m,80$ de queue sur 1 mètre à $1^m,20$ de côté; ces pierres sont posées par rangs horizontaux, pleins sur joints, avec du mortier de ciment Parker.

Ce second système est plus avantageux sous le rapport de la durée des brise-lames; mais il offre l'inconvénient de ne pas empêcher entièrement la transmission des mouvements du large.

Les môles en maçonnerie se composent d'un massif en moellons avec parements en pierre de taille; quelquefois l'on se contente de réunir les deux murs de parement par des contre-forts, et de remplir les cases ainsi formées au moyen de sable, gravier ou terre grasse.

Les contre-forts intérieurs ont 2 à 3 mètres de largeur; leur espacement varie de 6 à 12 mètres d'axe en axe.

Les murs de parement ont un fruit de 1/8 à 1/4. Leur épaisseur doit être supérieure à celle des murs de soutènement ordinaire des terres, l'expérience ayant prouvé que ces constructions se trouvent dans des circonstances exceptionnelles par suite de l'action des vagues; l'on a vu, en effet, des murs de parement récemment construits, céder,

par de fortes tempêtes, à la pression des terres qu'ils avaient soutenues en temps ordinaire.

Lorsque le relief du môle est faible, le remplissage doit être couvert d'un dallage maçonné en dos d'âne pour l'écoulement des eaux lancées par les vagues agitées.

Avant de commencer la maçonnerie sur une fondation en enrochement, on répand sur ce dernier une couche de béton destinée à remplir les vides; puis, une assise de gros blocs dont on remplit encore les intervalles de la même façon.

Les premières assises en maçonnerie construites sur ce genre de fondation sont très-exposées à l'action du siphonnement, qui les délave par dessous; et leur résistance à cette action n'est suffisante que lorsque la maçonnerie a atteint $1^{m},50$ de hauteur.

Le siphonnement a d'autant plus de puissance que la mer est plus agitée; dans ce cas, d'autres causes de dégradation se produisent encore par l'agitation du large. Ainsi, les pierres de parement, fortement secouées par le choc direct des vagues, tendent à s'ébranler, à se détacher du remplissage; et cet effet est accéléré par l'eau qui s'est infiltrée par dessus à marée haute, et qui tend, vers la marée basse, à sortir par les joints en entraînant le mortier.

Lorsque le relief du môle est très-grand, et que le noyau en est formé de petits moellons, la différence de tassement qui s'opère tend à séparer le parement du remplissage. Aussi, l'on cherche, autant que possible, à relier les pierres des revêtements entre elles et avec le massif intérieur. Nous avons détaillé au chapitre VII les divers moyens de liaison employés, ainsi que le profil à donner aux murs de parement.

Les maçonneries à la mer exigeant une grande rapidité de construction, il est important de choisir des mortiers hydrauliques de grande énergie; cette précaution est spécialement nécessaire pour les môles, qui sont exposés, pendant la construction, à être secoués en tous sens.

Il est prudent aussi, pour le même motif, de ne pas araser par assises d'une grande longueur; il est préférable de faire suivre en échelons les ateliers de deux ou trois assises, de façon que la maçonnerie avance progressivement sur une certaine hauteur et que chaque assise soit rapidement surchargée. Cette disposition devient indispen-

sable quand le massif est arrivé au niveau des mers moyennes, hauteur à laquelle il est le plus rudement attaqué par les vagues.

Lorsque le terrain est peu consistant, l'emploi des rysbermes en maçonnerie à la tête des jetées est nécessaire pour prévenir les affouillements engendrés par le ressac. Elles doivent être fondées le plus bas possible; leur surface de couronnement est disposée en talus doux ou en courbe pour rejeter vers le large les vagues qui y clapotent. C'est d'après ce système que l'on a établi le musoir de la jetée d'Aberdeen; il est formé de gros blocs formant une surface courbe unie, convexe à sa partie inférieure, concave au-dessus des hautes mers, et occupant une base de 2 1/2 sur 1 de hauteur.

Souvent les jetées pleines sont interrompues de distance en distance par des estacades ou claires-voies. Cette disposition se rencontre surtout lorsque deux jetées forment chenal, afin de rompre les ondulations qui se dirigent suivant l'axe; dès lors, les vagues passant d'une partie du chenal à une section plus large, s'y étendent et diminuent de hauteur et de vitesse. Afin de rompre la lame obliquement à l'axe du chenal, on établit les parties à claire-voie de façon à ne pas se correspondre. Le massif inférieur est disposé en dos d'âne ou en courbe convexe comme le couronnement des môles de faible relief.

La longueur des claires-voies doit être suffisante pour rompre complétement les vagues, mais elle ne doit pas être assez grande pour qu'elles puissent remonter le couronnement et produire dans le chenal un ressac plus ou moins nuisible.

La fig. 35 indique les dispositions de la claire-voie avec brise-lames établie dans la jetée Est de Dieppe. Elle se compose de 53 fermes (fig. 36) espacées de 3$^{m}$,00 d'axe en axe; deux poteaux de garde sont placés entre les fermes. Les pilots de celles-ci et les poteaux de garde ayant 0$^{m}$,30 d'épaisseur dans le sens de la jetée, les vides de la claire-voie sont de 0$^{m}$,70.

Chaque ferme est composée de deux poteaux-montants embrassés par des moises horizontales. D'autres moises inclinées forment deux croix de Saint-André, destinées à consolider le système et à l'arc-bouter contre le choc des vagues.

La claire-voie est établie sur une base en maçonnerie, dont la crête s'élève au niveau de la mer moyenne, et qui est fondée sur béton

à 1m,50 au-dessous des basses mers d'équinoxe. Une rysberme la défend du côté du chenal ; elle se compose d'un bétonnage contenu entre deux rangs de pilots jointifs et recouvert d'un plancher.

Le couronnement du massif en maçonnerie est prolongé vers l'intérieur sous forme de brise-lames, s'étendant en talus doux de 1/12 de pente jusqu'au mur d'enceinte.

## APPLICATION MILITAIRE.

### Digue de Cherbourg.

Cherbourg (fig. 38) est situé sur la côte septentrionale de la presqu'île du Cotentin, entre le cap de la Hogue à l'ouest et celui de Barfleur à l'est. L'étendue de la côte entre les deux caps est d'environ cinq lieues.

La saillie de cette langue de terre dans la Manche produit sur la section du canal un rétrécissement assez considérable pour modifier la vitesse de la masse liquide. D'un autre côté, étant placée en travers du double courant engendré par le flux et le reflux qui déversent successivement les eaux de l'ouest à l'est du Cotentin et réciproquement, il arrive que les marées arrêtées brusquement dans leur mouvement se précipitent avec violence contre les flancs de la presqu'île, et acquièrent un accroissement de vitesse en passant devant sa côte Nord. De là une agitation considérable et intermittente qui ne devient supportable qu'aux approches des mers étales.

La position avancée du Cotentin amène encore d'autres perturbations qui se font surtout sentir dans les baies ou anses de la côte septentrionale. Le courant de flot porte au N.-E. dans la Manche, et le jusant au S.-O. Or, la saillie de la presqu'île produit dans le premier le phénomène que nous avons décrit sous le nom de ressac par transmission ; le courant de flot, rasant le cap de la Hogue, entraîne par communication latérale les parties de mer intérieure qu'il touche en passant devant les baies, et leur imprime un mouvement qui se traduit en tourbillon au premier obstacle, c'est-à-dire en contre-courant.

Ainsi, l'anse de Saint-Martin (fig. 38), qui par sa position n'est pas sur le passage du courant de flot, n'en est pas moins exposée à ses

effets par suite de la saillie de la presqu'île. Ce courant, en passant devant la baie, imprime un mouvement de l'ouest à l'est à toute la tranche liquide qui s'étend du cap de la Hogue aux rochers de la Coque; et ceux-ci, en lui faisant obstacle, déterminent un contre-courant qui marche vers l'ouest le long de la côte.

A Cherbourg, avant la construction de la grande digue, le courant de flot rasait les pointes de Querqueville (fig. 39), du port militaire et des Flamands. Il produisait un contre-courant de l'est à l'ouest dans l'anse du port de commerce devant les jetées.

L'atterrage de Cherbourg servait jadis de refuge naturel aux navires par les gros temps ou les vents contraires. Aujourd'hui encore, Cherbourg n'est pour le commerce qu'un port de refuge ou de relâche. En effet, sur 1,500 bâtiments qui y arrivent par année, 500 à peine y laissent leur cargaison; les autres s'y arrêtent pour fuir la tempête ou pour y attendre un vent favorable à leur sortie de la Manche; car les vents régnants à Cherbourg sont Ouest, et accompagnent presque toujours les gros temps.

*Vauban*, le premier, mit en évidence l'importance maritime de Cherbourg comme position militaire. Sous le gouvernement de Richelieu, de Mazarin et de Colbert, l'on avait bien senti la nécessité d'établir une forte position maritime en face des grands ports militaires de l'Angleterre, mais l'atterrage de Cherbourg ne parut alors qu'un abri provisoire, un mouillage médiocre qu'il était impossible de transformer en rade sûre et facile.

En 1686, *Vauban* fut envoyé dans le Cotentin. Malheureusement les finances se trouvaient déjà obérées malgré toutes les ressources créées par Colbert, et l'on dut renoncer à l'amélioration du mouillage ainsi qu'au creusement d'un bassin pour vaisseaux de ligne à la pointe du Homet. Par suite, Vauban se résigna à établir un refuge pour une flotte de frégates en même temps qu'une enceinte bastionnée pour défendre la place vers l'intérieur. A cette époque, le port de Cherbourg était formé d'une lagune profonde, séparée de la mer par une écluse et située à l'emplacement du bassin de commerce actuel.

En 1687, l'on mit la main à l'œuvre; mais les travaux, poussés d'abord avec activité, furent arrêtés en 1688, à cause de la ligue d'Augsbourg. Dans l'impossibilité de pouvoir défendre Cherbourg,

Louis XIV ordonna d'en raser les fortifications plutôt que de les laisser tomber aux mains des Anglais.

En 1692, après le désastre de la Hogue, que l'on peut attribuer autant aux défauts de l'atterrage qu'à l'écrasante supériorité numérique des flottes anglaise et hollandaise, Vauban fut de nouveau chargé de visiter le littoral du Cotentin, et d'étudier spécialement les améliorations à apporter à la rade de la Hogue considérée comme refuge. Les inconvénients graves de l'atterrage précédent le firent rejeter complétement par Vauban comme position maritime, et il n'hésita pas à donner la préférence à la rade de Cherbourg.

Afin de compléter les avantages naturels de la position, l'illustre ingénieur proposa le creusement de bassins profonds pouvant recevoir des vaisseaux de ligne, et l'établissement d'un môle destiné à garantir les flottes en rade contre l'agitation du large et à favoriser les sorties ou la défensive. Mais le mauvais état des finances vint encore limiter ses vues, et le força d'adopter un système de défense restreinte qui se traduisit par deux projets successifs plus ou moins défectueux.

Dans son premier projet, Vauban proposa la construction de deux môles, l'un de 200 toises, l'autre de 600 toises de longueur, laissant entre leurs musoirs une passe de 900 toises, et s'enracinant, le premier à la pointe du *Homet*, le second à celle de l'île *Pelée* (fig. 39). La rade ainsi limitée était évidemment trop petite ; aussi, Vauban avait-il admis que les vaisseaux de ligne auraient dû s'amarrer à l'ouest de la jetée du Homet, faute de place dans la rade ou dans un bassin. Le second projet, aussi restreint que le précédent, ne comprenait aucune digue, et se bornait à la construction d'un vaste bassin à flot sur l'emplacement du port militaire actuel.

Aucune suite ne fut donnée aux projets de Vauban. On se contenta en 1738 de relever les écluses et les murs du port de commerce, et l'amélioration de la rade de Cherbourg fut abandonnée jusqu'à l'avénement de Louis XVI.

En 1775, le vicomte *de la Bretonnière*, commandant la marine à Cherbourg, proposa de couvrir la rade par une digue jetée à 650 mètres au delà de l'emplacement qu'elle occupe aujourd'hui. Ce projet avait pour but d'agrandir le mouillage trop restreint de Vauban, et de permettre d'exécuter à couvert, et à l'abri des vues de l'ennemi, toutes

les manœuvres d'appareillage, les approvisionnements d'eau, de charbon, de munitions, etc.

Les idées de M. de la Bretonnière furent appuyées par la marine et le gouvernement, mais vivement combattues par le génie militaire qui proposait le système de Vauban. L'on posa contre la grande digue quelques objections sérieuses, basées sur ses énormes dimensions et sur l'impossibilité de fonder à une aussi grande distance au large, à cause de la violence des courants produits par le renversement des marées. Cette dernière objection parut fondée, et, en 1781, l'on s'arrêta définitivement à l'emplacement actuel.

Ce projet mixte présentait des inconvénients dont la gravité n'a fait que s'accroître avec les perfectionnements introduits dans l'artillerie et dans la marine. Ainsi, l'anse des Galets est trop restreinte pour permettre, comme à Portsmouth par exemple, une grande concentration des forces navales du pays. D'un autre côté, le ravitaillement et l'appareillage d'une partie de la flotte devra se faire à découvert, en avant de la digue, en vue des croiseurs ennemis; la retraite aussi se fera dans des conditions désavantageuses vers une rade étroite, resserrée et d'un abord dangereux. Enfin, l'emploi des canons rayés est venu justifier les prévisions de M. de la Bretonnière, et suffit à lui seul pour faire regretter par la marine française l'absence de tout essai d'immersion à une plus grande distance de la côte.

L'alignement adopté pour la digue se dirigeait de l'île Pelée à la pointe de Querqueville, sauf à briser légèrement cette direction dans la partie Est, afin d'en placer le revers extérieur sous les feux flanquants du fort de l'île Pelée.

Quelques discussions surgirent pour le tracé et le mode d'exécution. L'on proposa d'abord de composer la digue de deux tronçons égaux, laissant deux passes latérales et une passe d'environ 400 mètres au milieu. Mais il fut reconnu bientôt que cette dernière offrirait moins d'avantages pour la manœuvre que d'inconvénient pour le mouillage; dès lors on s'arrêta au tracé existant aujourd'hui, dont le développement est d'environ 3700 mètres.

Quant au mode de construction, l'on eut à choisir entre les systèmes présentés par M. de la Bretonnière, M. Decaux, inspecteur général du génie et M. *de Cessart,* ingénieur des ponts et chaussées, qui

s'était déjà distingué par la construction du pont de Tours.

M. de la Bretonnière proposa de former d'abord un noyau fixe continu, en coulant des carcasses de vieux navires remplies de maçonnerie, et d'y appuyer le corps de la digue qui s'exécuterait à pierres perdues. M. Decaux trouva préférable de construire par encaissement, vers le milieu du tracé, une île factice solidement enracinée au fond, et surmontée d'un fort, puis de partir de ce point fixe pour étendre la digue des deux côtés, en profitant de l'expérience acquise dans la première partie du travail. M. de Cessart (1) proposa de remplacer le projet de môle continu par un système de cônes tronqués, échoués sur l'alignement adopté, et à 45 mètres d'axe en axe. Ces troncs de cône, au nombre de 90, étaient destinés à rompre les coups de mer; ils rendaient aussi le passage impossible, leur sommet étant au niveau des marées hautes. Ils se composaient d'un coffrage en charpente dont l'intérieur était rempli de pierres, et avaient 20 mètres de hauteur sur 45 et 19 mètres de diamètre. La partie inférieure était à claire-voie. Les cônes renfermaient à l'intérieur 18 barils remplis de fer, de plomb et d'autres matières pesantes; ils étaient garnis à l'extérieur d'une ceinture de barils goudronnés, complétement vides, hermétiquement fermés, et destinés à les maintenir à la surface de l'eau. Ces barils, au nombre de 30, avaient des dimensions calculées sur le poids total de l'appareil. Dès que les cônes avaient été remorqués sur l'emplacement où ils devaient être coulés, on opérait leur immersion en coupant les amarres qui retenaient les barils extérieurs. Ceux-ci flottaient alors à la surface, tandis que les cônes s'enfonçaient lentement et finissaient par atteindre le fond; on les remplissait alors de pierres, de blocs et de blocailles.

L'on adopta le système proposé par M. de Cessart, et le premier cône, construit au Havre, fut mis en place le 1er juin 1784. Mais on reconnut bientôt que les pierres, au lieu de se tasser, étaient secouées, bouleversées, dispersées même, par suite de l'ébranlement des cônes sous l'action des tempêtes. Vainement on essaya de parer à cet inconvénient en chaussant la base inférieure avec des enrochements à pierres perdues; dans l'hiver de 1786 à 1787 tous les cônes furent

(1) De Cessart. *Description de travaux hydrauliques.*

renversés, et en 1788, ce mode de construction fut complétement abandonné. L'année suivante tous les cônes furent recepés au niveau des basses mers, excepté celui de l'extrémité Est de la digue ; l'on essaya d'abord d'utiliser les massifs en enrochement produits par les cônes, et de les exhausser au moyen d'assises de béton coulé. Mais les tassements inégaux de la base eurent bientôt divisé ces assises en blocs plus ou moins considérables; l'un d'eux, qui avait 1m60 d'épaisseur, se sépara en plusieurs morceaux de 12 à 15 mètres cubes, qui, depuis lors, ont résisté aux plus violentes tempêtes; ainsi que nous l'avons déjà dit dans ce chapitre, c'est de ce résultat et d'observations analogues faites sur des blocs de la jetée d'Alger que l'on a conclu le volume nécessaire aux pierres pour résister à l'action des vagues de la haute mer.

L'emploi des massifs en béton fut alors remplacé par un système plus simple, celui des enrochements à pierres perdues, auxquels servirent d'appui les débris des cônes de M. de Cessart.

Les travaux arrêtés en 1789 furent repris sous le consulat. En 1802, Bonaparte décida qu'un plateau élevé de 3 mètres au-dessus des marées hautes serait construit vers le milieu de la digue, pour servir de base à un fort destiné à compléter le système de défense de la rade; les musoirs des extrémités devaient aussi être disposés pour recevoir de fortes batteries.

Le 18 décembre 1803, une bourrasque renversa les parapets du fort en épargnant le réduit. L'on reconnut dès lors que la crête de la digue, c'est-à-dire sa partie la moins épaisse, la moins tassée, était précisément celle qui devait offrir le plus de solidité, attendu que la force des vagues va en décroissant de la surface au fond à cause de la pression que les couches liquides exercent par leur poids les unes sur les autres. La partie supérieure du môle, égalisée en plate-forme, reçut un couronnement en maçonnerie, sur lequel on construisit un fort plus important que le premier, afin de pouvoir résister à une attaque de vive force.

Cette construction n'eut pas un meilleur sort, le couronnement n'ayant pas reçu une hauteur suffisante. En 1808, par une marée extraordinaire, la mer passa au-dessus du terre-plein, renversa les casernes, et balaya les débris du fort et de son armément jusque sur

le revers d'aval de la digue. Ces ouvrages ayant été restaurés dans les mêmes conditions, et détruits de nouveau par la tempête du 11 novembre 1810, Napoléon ordonna d'excaver l'enrochement à l'emplacement du fort jusqu'au niveau des basses mers d'équinoxe, et de construire sur cette base un couronnement en maçonnerie formée de blocs de granit et s'élevant à une hauteur totale de $9^{m}10$, c'est-à-dire à $2^{m}50$ au-dessus des hautes mers de vives eaux.

Malgré la cohésion de la maçonnerie, la base fut bientôt affouillée par suite de l'action violente des lames et des affaissements successifs de l'enrochement en pierres sèches, dont le profil tendait sans cesse à atteindre sa courbure d'équilibre; en effet, le talus extérieur, calculé à l'origine sur 5 mètres de base pour 1 mètre de hauteur, avait atteint en 1792 une base de 8 mètres, et ce n'est guère qu'en 1829 qu'il atteignit sa courbure d'équilibre, représentée par un talus de 11 sur 1.

Les blocs une fois disloqués entre eux et ébranlés à cause de leur trop faible volume, les vagues les soulevaient et les roulaient sur le talus et le couronnement jusqu'au delà de la crête intérieure. Il fallut donc encore renoncer à ce mode de construction.

M. *Duparc,* directeur des travaux, proposa un autre système basé sur un résultat curieux observé à la suite de la tempête du 12 février 1808. Dans le désastre du fortin, les citernes et les latrines furent épargnées, parce qu'elles étaient établies dans un fort massif en béton que les vagues ne parvinrent pas à ébranler. Partant de là, M. Duparc proposa d'élever l'enrochement à hauteur des basses mers de vives eaux, et de le couronner par un prisme de béton et de maçonnerie, ayant 10 mètres d'épaisseur et une hauteur totale de $8^{m}60$, y compris une fondation analogue de $0^{m}90$ (fig. 40). La crête se trouvait ainsi à $2^{m}00$ au-dessus des hautes mers d'équinoxe.

Ce projet fut adopté. L'on ajouta au massif en béton un couronnement de $2^{m}50$ d'épaisseur sur une hauteur de $1^{m}65$, régnant du côté du large et formant parapet. Le sommet de l'enrochement fut recouvert du même côté par des blocs naturels, de 1 mètre à 2 mètres cubes, et par des blocs en béton de 6 mètres cubes rangés au pied du revêtement. Ce dernier travail fut exécuté successivement, avant la construction de la partie de muraille qu'il était destiné à garantir; cependant, une certaine quantité de blocs en béton fut aussi échouée simul-

tanément à l'emplacement du corps de la digue, afin de diminuer le temps nécessaire à l'exécution de l'assise inférieure.

La construction de la muraille s'exécuta par assises d'environ 0m70 de hauteur, dont trois s'élevaient en même temps sur tout le développement. Chacune des trois assises inférieures avait 25 à 30 mètres de longueur, et elles se suivaient par gradins. La première assise, exigeant les courts intervalles des plus basses mers, était entreprise sur toute la longueur de la digue, et l'on commençait à y couler le béton avant l'instant de la marée basse, dès qu'il n'y avait plus que 0m40 à 0m50 sur le sommet de l'enrochement; cette assise se composait du mélange des gros blocs échoués et d'un béton de remplissage. Les deux assises suivantes étaient formées de béton et de forts moellons posés à bain de mortier. Le béton était contenu par les gros blocs de la rysberme nord et par les pierres de taille du parement placées pendant la marée basse précédente.

Les trois assises inférieures, formant un massif d'environ 2 mètres de hauteur, arrivaient au niveau auquel les vagues commencent à devenir le plus puissantes. Aussi, les ateliers des trois assises suivantes se trouvaient très-rapprochés, afin de monter et d'élargir le plus possible les parties du massif qu'on était forcé d'abandonner pendant la haute mer pour les reprendre à la marée suivante.

Les pierres de taille du parement étaient posées à bain de mortier sur cales de schiste dur. Les joints, garnis extérieurement d'étoupe, étaient d'abord coulés avec du mortier clair; puis, lorsqu'on s'était assuré que le massif était bien plein et que l'eau n'en sortait plus à basse mer, l'on remplaçait l'étoupe par du ciment de Pouilly, après avoir bien nettoyé les joints.

Ainsi qu'on le remarque toujours dans les maçonneries construites sur enrochements, des affaissements se sont opérés dans la digue de Cherbourg, dès la pose des premières assises de la muraille.

Ces résultats doivent être attribués aux tassements des pierres de l'enrochement et aux ébranlements des maçonneries elles-mêmes; ces derniers sont causés par le choc direct des vagues dans les gros temps, ou par la sous-pression dans le siphonnement et la pression qui lui succède; à la suite de ces ébranlements les maçonneries écartent parfois les parties mobiles de l'enrochement inférieur, et y pénètrent plus

ou moins. De là des lézardes, des ruptures même, les résistances inégales de l'enrochement devant amener des enfoncements inégaux de la maçonnerie.

A la digue de Cherbourg, les affaissements ont atteint 10 centimètres, et des nivellements minutieux ont fait voir que, par de grandes tempêtes, le massif de la muraille éprouvait des ébranlements même après deux ans de construction, et alors que, depuis longtemps, les talus de l'enrochement avaient pris leur courbure d'équilibre. C'est ainsi que la tempête de décembre 1836 produisit dans les parties exécutées en 1834 une lézarde de 100 mètres de longueur, outre plusieurs disjonctions transversales. Cependant, depuis cette époque, les prévisions de M. Duparc ont été confirmées par l'expérience : le massif supérieur n'a point éprouvé de tassement sensible, et la pression, produite par son poids, n'a fait que consolider la stabilité de l'enrochement.

La digue a 3713 mètres de développement à la base et 3350 mètres au couronnement. Ses deux branches forment un angle de 169°, au sommet duquel se trouve le grand fort central, et dont les extrémités sont couronnées par des fortins circulaires.

Le musoir de l'ouest, situé à 1800 mètres de la pointe du Homet, laisse entre lui et la base Savagnac une passe de 1300 mètres; la passe de l'est est de 1100 mètres entre le musoir et l'île Pelée.

La digue couvre un mouillage d'environ 800 hectares, dont l'une des moitiés, l'anse du Galet, peut servir à l'appareillage des vaisseaux, et l'autre, le banc de l'île Pelée, à l'ancrage des frégates et des bâtiments légers. En admettant que ces derniers aillent se placer en dehors du mouillage, l'on pourrait amarrer dans la rade environ 50 bâtiments de haut bord; ce nombre devrait être diminué de plus de moitié pendant les gros temps. Mais Cherbourg possède aujourd'hui près de 22 hectares de bassins disposés pour le flottage des plus grands vaisseaux de guerre et capables d'en recevoir 38 à 40 dans les meilleures conditions d'espacement et d'amarrage.

# CHAPITRE NEUVIÈME.

## FONDATIONS DES OUVRAGES MARITIMES.

---

### CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

Les fondations des ouvrages hydrauliques se construisent directement sous l'eau ou s'établissent à sec au moyen d'épuisements.

Dans les constructions hydrauliques ordinaires, le genre et les dimensions des batardeaux varient suivant la nature du terrain et la hauteur d'eau à retenir. Nous traiterons cette question dans la troisième partie de ce Traité, ainsi que celle des batardeaux permanents en maçonnerie.

Dans les ouvrages maritimes, les batardeaux de retenue sont généralement de véritables digues. On les construit en terre ordinaire ou glaise, en terre et fascinages, et même en béton. Ce dernier genre rentre dans les travaux que nous avons détaillés au chapitre VIII; quant aux digues, nous les examinerons en traitant des batardeaux.

Les différents genres de fondations employés pour les ouvrages maritimes sont : 1° les enrochements; 2° les bétonnages; 3° les pilotis; 4° les fondations tubulaires; 5° les caissons foncés; 6° les encaissements ou caissons sans fond.

A part les pilotis et les fondations tubulaires, tous ces genres de travaux s'emploient lorsque la couche supérieure de terrain compressible n'a qu'une faible épaisseur, ou bien, lorsqu'on a établi au préalable un pilotis pour les soutenir. Ils s'établissent directement sous l'eau, sans que l'on ait recours aux épuisements.

## ENROCHEMENTS ET BÉTONNAGES.

Nous avons détaillé, au chapitre VIII, les procédés à employer pour fonder par enrochement ou à l'aide du béton coulé directement sous l'eau.

Quant aux fondations en béton que l'on établit au moyen d'épuisements, elles rentrent dans le domaine des constructions ordinaires. Il faut remarquer cependant qu'elles exigent un surcroît de précautions, et des dispositions toutes particulières, pour prévenir les filtrations dues aux pressions des eaux. Nous entrerons dans plus de détails, à ce sujet, en traitant la question des écluses; nous examinerons seulement ici ce qui se rapporte aux fondations des murs de soutènement des ouvrages maritimes exposés à l'action des marées, mais qui ne sont pas noyés ou construits au large.

Les pressions parfois considérables que les murs de revêtement ont à supporter tendent à produire des filtrations sous les fondations de l'ouvrage et même à travers la maçonnerie. Il est de la dernière importance d'empêcher ces résultats.

L'influence de la pénétration de l'eau est des plus désastreuses. Lors même qu'elle ne traverserait pas entièrement la base des fondations, elle exercerait de bas en haut une réaction nuisible à la stabilité du mur.

Il faut donc, autant que possible, réaliser les conditions suivantes : 1° donner aux fondations des empatements convenables, et les enraciner dans le sol, de façon à arrêter la marche des filtrations; 2° calculer l'épaisseur du revêtement, en tenant compte de tous les éléments du problème, et spécialement des variations considérables que produisent les marées dans la poussée; 3° rendre la maçonnerie parfaitement pleine et inattaquable par l'eau.

Lorsque le terrain n'est pas assez compacte pour s'opposer aux filtrations, on commence par abaisser les fondations, tant pour gêner l'eau dans sa pénétration, que pour donner au mur un surcroît de résistance au glissement par la buttée des terres. On forme aussi quelquefois des enracinements de $1^{m}00$ à $1^{m}50$ en contre-bas du plan gé-

néral de dérasement du terrain, et d'une épaisseur variable entre 1m00 et 3m00 (fig. 41).

Lorsque ces précautions ne suffisent pas, on préserve la tête des fondations vers la mer au moyen de corrois en béton *m*, ou de files de pilots formant coffrage.

La pénétration des eaux peut se produire sous les murs à travers des terrains compactes en apparence ; tels sont ceux qui se composent d'argiles à feuillets minces, même très-serrés, qu'on doit entamer d'ordinaire au pic et à la mine. La plus grande prudence doit donc présider à l'étude du genre de fondations qui convient le mieux d'après les circonstances.

Pour obtenir une maçonnerie bien pleine et imperméable, il faut l'exécuter avec tout le soin possible, et surtout éviter les tassements irréguliers qui se produisent lorsqu'on donne des épaisseurs inégales aux assises du massif et à celles des parements. Le mortier doit être très-hydraulique, et il faut choisir de préférence les chaux dont les hydrates contiennent le moins de parties solubles.

Malgré tous les soins et les précautions, il est souvent difficile d'obtenir une imperméabilité absolue dans les premiers temps, surtout lorsque les pressions d'eau sont considérables. Le parement intérieur présente alors un suintement blanchâtre qui finit par disparaître ultérieurement, lorsque la maçonnerie a été bien exécutée.

## FONDATIONS SUR PILOTIS.

*Définitions.* — Ce genre de fondations s'emploie spécialement lorsque le sol incompressible est situé sous des couches compressibles à une profondeur trop grande pour qu'on puisse le mettre à découvert sans qu'il en résulte des dépenses extraordinaires. Il convient aussi lorsque le terrain naturel, quoique très-résistant à la pression verticale, n'est pas de nature à pouvoir résister à l'action des filtrations ou aux érosions des eaux en mouvement ; tels sont, par exemple, les terrains composés de sables argileux ou mêlés de cailloux.

L'emploi des pilotis dans les fondations hydrauliques offre en outre de grandes facilités pour remédier aux effets désastreux des filtrations,

lorsque celles-ci sont parvenues à miner le pied ou la base des ouvrages.

Cependant, on ne doit jamais y avoir recours lorsqu'il n'est pas possible de faire prendre pied aux pilots dans une couche solide, tout en restant dans certaines limites de longueur.

L'exécution d'un pilotis ordinaire consiste à enfoncer, dans toute l'étendue des fondations, des pilots espacés de $0^m70$ à $1^m20$ d'axe en axe, suivant la charge qu'ils doivent supporter et selon leur diamètre, qui est en général environ $\frac{1}{31}$ de leur longueur sans avoir moins de $0^m18$.

Les pilots étant disposés en quinconce et battus jusqu'au refus déterminé, on les recèpe de niveau à une certaine hauteur, on enlève la terre qui se trouve entre eux et qui a été plus ou moins ameublie par le battage, et on la remplace, dans les constructions hydrauliques, par du béton ou un remplissage en mortier hydraulique fortement comprimé ; cette compression des matériaux a pour but de maintenir la tête des pilots, d'augmenter les frottements latéraux qui s'opposent à l'enfoncement, et d'accroître la rigidité du système.

On pose ensuite sur la tête des pilots un grillage en charpente, formé de *longrines* reliant les files longitudinales, et de *traversines* s'assemblant sur les longrines ; parfois, ce sont les traversines qui sont assemblées sur les têtes des pilots, suivant la direction des poussées.

Le remplissage en maçonnerie ou en béton étant arasé au niveau du grillage, on établit sur le tout une plate-forme en madriers ; ou bien, comme la plate-forme adhère mal à la maçonnerie supérieure, on la remplace par une forte couche de béton enveloppant les têtes des pilots, sauf à placer sur ce massif un rang de forts libages pour mieux répartir la pression.

*Sondage du terrain.* — Lorsque le terrain n'est pas trop mauvais, on emploie directement la *sonde du mineur*. Celle-ci est composée d'une série d'allonges, rondes ou carrées, en fer forgé, de 2 à 3 centimètres de diamètre ou de côté, terminée à la partie supérieure par un œillet et à l'autre extrémité par une pièce qui varie suivant la nature du terrain. Ainsi, dans les terres ordinaires, les argiles, les sables fermes, on se sert de la *tarière* ; dans les roches plus ou moins dures,

on emploie le *trépan* ou la *barre à mine ;* on a recours à *l'entonnoir à sable* dans les terrains vaseux, de sables mouvants et généralement dans tous ceux qui sont trop liquides pour qu'on puisse les ramener au jour par la tarière.

Dans les terres très-molles, vaseuses ou de sables boulants, le trou de sonde se remplit très-souvent au fur et à mesure qu'on le perce ; il faut alors user de certaines précautions. Si l'on ne doit pas descendre à une très-grande profondeur, ou bien lorsqu'on veut sonder le fond d'un fleuve ou d'un terrain immergé, on fait usage d'un pilot creux bien droit, et ensaboté, qu'on bat à la sonnette et dont on vide l'intérieur soit avec la tarière soit avec l'entonnoir à sable. Si la profondeur du sondage doit dépasser 14 à 15 mètres, on remplace le pilot par une caisse creuse, portant un sabot, et ayant 7 à 8 mètres de longueur, que l'on enfonce successivement à coups de mouton. Après avoir sondé autant que possible à l'intérieur de cette caisse, on y ente une deuxième de même section si c'est possible, et si le terrain est trop résistant, on donne à celle-ci des dimensions suffisantes pour qu'elle puisse être battue à l'intérieur de la première. On continue ainsi jusqu'à la profondeur voulue.

*Pilots d'épreuve.* — Outre l'exécution de sondages, il est indispensable de battre un certain nombre de pilots d'épreuve, pour s'assurer des diverses profondeurs de la couche incompressible, et déterminer ainsi les longueurs à donner au pilotis. L'exemple suivant présentera une idée suffisante de la marche à suivre en cette circonstance ; il est relatif aux travaux préliminaires exécutés pour la construction des batteries casemattées du nouveau fort *Sainte-Marie* (*Bas-Escaut*).

Le tracé du pilotis étant arrêté, on choisit, sur le plan, quelques points déterminés par les numéros des pilots qui y correspondent, et on bat ces pilots définitivement. Le tableau ci-contre donne les résultats de cette opération pour les six pilots battus sur le front 1-2, ainsi que ceux des sondages pratiqués à côté de ces derniers. Quatre d'entre eux ont dû recevoir une enture, le battage devant continuer jusqu'à ce que le refus relatif ou l'enfoncement par volée de trente coups ne fût plus que de $0^{m}01$, le poids du mouton étant de 450 kilogrammes.

| NUMÉROS DES PILOTS. | LONGUEUR des pilots. | NOMBRE de volées de 30 coups. | FICHE totale. | OBSERVATIONS. | SONDAGES. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 83 | 14,09 | Enture de 4m,00 à la 36e volée, dont le refus relatif était 0,13. | 1m,20 terre végétale; puis sable argileux. |
| 2 | 12,20 | 75 | 15,38 | Enture de 3m,20 à la 22e volée, dont le refus relatif était 0,04. | 1m,10 id. id. |
| 3 | 10 | 85 | 13,01 | Enture de 5m,00 à la 17e volée, dont le refus relatif était 0,035. | 1m,30 id. id. |
| 4 | 9,15 | 67 | 10,38 | | 1m,10 terre végétale; 3m,40 sable argileux; 0m,15 tourbe; puis sable argileux. |
| 5 | 10,15 | 80 | 12,69 | Enture de 4m,00 à la 26e volée, dont le refus relatif était 0,05. | 1m,30 terre végétale; 2m,20 tourbe; 2,m50 terre tourbeuse; puis sable argileux. |
| 6 | 11 | 69 | 11,38 | | 0m,80 terre végétale; 2m,30 tourbe; 2m,60 terre tourbeuse; puis sable argileux. |

Rapportés au plan de recépage dont la cote était (1,725), les pilots d'épreuve avaient donc respectivement les longueurs de fiche suivantes par rapport à ce plan :

| | | | |
|---|---|---|---|
| N° 1 . . . | 13,345 | N° 4 . . . | 8,60 |
| N° 2 . . . | 15,400 | N° 5 . . . | 12,60 |
| N° 3 . . . | 11,310 | N° 6 . . . | 11,30 |

Il est à remarquer que, chaque fois que l'on a mis une enture, l'enfoncement a diminué environ des 3/4; cette circonstance tendait à faire supposer une certaine puissance de fiche qui n'existait pas réellement, et qui n'était due qu'aux pertes de force vive causées par

l'enture. Il est donc probable que, si les pilots nos 1, 2, 3 et 5 eussent été d'une seule pièce, il eût été nécessaire de prolonger encore le battage pour arriver au refus de 0,01 obtenu.

*Longueur des pilots.* — La charge qu'un pilot peut porter dépend évidemment de la relativité du refus; mais on est loin d'être d'accord sur la relation qui doit exister entre ces deux quantités.

D'après *Perronet*, un pilot ordinaire peut être chargé jusqu'à concurrence de 25,000 kil. lorsque, sous l'action répétée du choc d'un mouton pesant 600 kil. et tombant 30 fois de suite d'une hauteur de 1m20, ou bien dix fois de suite d'une hauteur de 3m60, il ne s'enfonce pas plus de 0m01. Pour les charges inférieures à 25,000 kil., la grandeur du refus relatif pourrait, d'après cet auteur, être augmentée en raison inverse de la charge, en supposant que le diamètre et la longueur des pilots restassent les mêmes. Par suite, 0m02 de refus suffiraient à des pilots qui n'auraient à porter que 12,500 kil.; ainsi de suite.

Les charges obtenues par la règle de Perronet sont généralement trop faibles.

Les ingénieurs hollandais déterminent la relation entre la charge et le refus relatif au moyen de la formule suivante due à *Woltman* :

$$Q = \frac{HP^2}{6e(P+p)}$$

dans laquelle on représente par :

P le poids du mouton ;
H sa hauteur de chute ;
$p$ le poids du pilot ;
$e$ l'enfoncement au dernier coup du mouton ;
Q la charge totale que le pilot peut supporter.

La relativité du refus à admettre doit évidemment dépendre de la charge permanente, augmentée des surcharges accidentelles, de la résistance du terrain compressible, de la longueur de fiche dans la couche incompressible, et de la résistance de cette dernière.

Dans les travaux militaires, elle doit varier aussi avec le genre et le but des constructions. Ainsi, une batterie casematée, exposée par

le tir à de forts ébranlements, doit être établie sur une base plus immuable qu'une simple caserne. Une écluse, un aqueduc, sujets aux trépidations de l'eau ; un magasin à poudre, dans lequel une simple crevasse serait très-dangereuse, sont autant de constructions spéciales qui exigent un surcroît de stabilité.

Ces considérations ont prévalu dans la détermination des longueurs à donner aux pilots de fondation des batteries casematées du fort Sainte-Marie. Un refus relatif de $0^m01$ a été exigé pour tous, le diamètre à $1^m00$ sous la tête restant en rapport avec les longueurs. La charge de chacun d'eux est d'environ 14,000 kil.

Dans la construction de la caserne à l'épreuve du fort *Lillo* (*Bas-Escaut*), établie sur un terrain analogue à celui de Sainte-Marie, la charge moyenne est de 18,000 kil. ; on s'est contenté de battre à fond tous les pilots en leur donnant une longueur uniforme de $11^m00$. Les refus ont varié de $0^m13$ à $0^m24$. Ce bâtiment s'est parfaitement maintenu. Mais il faut remarquer qu'il est isolé et établi sur un terrain rassis, tandis qu'à Sainte-Marie de grands remblais devaient s'élever sur trois faces de l'édifice, et que ce dernier est exposé à éprouver de grands ébranlements par le tir.

*Section des pilots.* — La section transversale S des pilots se détermine d'après leur longueur et la charge qu'ils doivent supporter. Sa limite inférieure sera donnée par la relation :

$$S = \frac{P}{nR'}$$

où : P représente le poids total de la construction ;
$n$ le nombre de pilots ;
R′ la limite de la charge permanente.

D'apres Rondelet, un pilot peut être chargé de $50^k$ par centimètre carré de section ; mais il conseille de limiter la pression à $35^k$. On aurait donc :

$$S = \frac{P}{35\,n}$$

Ordinairement la section se détermine au moyen de la formule pratique suivante, due à Perronet :

$$D = 0^m,24 + (L - 4^m)\ 0^m,015$$

dans laquelle D représente le diamètre du pilot et L sa longueur.

Les dimensions transversales se fixent généralement en exigeant une certaine circonférence mesurée à 1m00 au-dessous de la tête. Comme les pilots en sapin présentent parfois un renflement vers le gros bout, il faut avoir soin de mesurer plus bas, à la partie régulière.

*Préparation.* — Les essences employées pour pilotis sont : le chêne, le pin, le sapin, le hêtre et l'aune. Ces deux dernières résistent bien dans des terrains constamment humides ; le chêne est coûteux ; les résineux sont souvent préférés, tant par économie que parce qu'ils présentent un tronc plus droit et plus régulièrement décroissant de grosseur.

La tête des pilots est *frettée* après avoir été sciée bien carrément. Le pied est *affûté* ou *ensaboté* suivant la résistance du terrain.

*Battage.* — Le battage s'exécute au moyen de *sonnettes*, ou par des machines spéciales mises en mouvement par la vapeur.

Dans les terrains consistants, on commence le battage par le centre de l'ouvrage ; le contraire a lieu lorsqu'on veut resserrer le terrain pour augmenter sa résistance au frottement.

Les pilots se battent le petit bout en avant ; cependant on fait parfois l'inverse dans certains terrains argileux, où la trépidation produite par le battage des pilots voisins fait sortir ceux qui étaient battus.

Quelquefois le pilot semble arrivé au refus absolu, mais si on le laisse reposer quelques jours, il s'enfonce de nouveau plus ou moins aisément. Cet effet se présente surtout lorsqu'on arrive à une couche de tourbe.

Dans la construction des ouvrages exposés à l'action directe et continue des vagues de la mer, il peut arriver que les pilots battus dans le sable de l'estran soient déchaussés, pendant l'opération même du battage, par le ressac que produit la marée haute. Il se forme autour du pilot un affouillement conique, dont la profondeur atteint jusqu'à 3 mètres en quelques marées. Pour prévenir cet inconvénient, on peut faire suivre immédiatement le battage par un enrochement ; ou bien, échouer à l'avance, sur l'emplacement à piloter, des radeaux en fascinages chargés de moellons.

Ce dernier système a été employé jadis aux jetées de Dunkerque. Les radeaux avaient 11 mètres de longueur dans le sens perpendicu-

laire à l'axe de la jetée, et 8 mètres de largeur; leur épaisseur variait de 0m60 à 1m00. Les piquets des claies destinées à former cases faisaient d'abord saillie à leur tête. On coulait le radeau à marée basse au moyen de blocailles, puis on enfonçait les piquets. Restait à battre les pilots qui, en perçant les radeaux, les fixaient complétement.

*Sonnettes à tiraudes.* — Ces sonnettes sont généralement employées, quoique leur effet utile soit très-faible Leur principal avantage consiste en ce qu'elles sont d'une installation facile et qu'elles peuvent se déplacer aisément.

L'expérience apprend que l'effet maximum produit par un homme employé à soulever des fardeaux en tirant verticalement une corde correspond à un effort de 18 kil., à une vitesse moyenne de 0m20 par seconde, et à une durée de travail journalière de six heures. On ne peut guère compter que sur 16 à 17 kil. de traction, par homme, avec des moutons de 300 kil. ; et sur 14 à 15 kil. quand le poids du mouton atteint 500 kil. Cette différence provient de ce que l'angle des tiraudes avec la corde principale augmente avec le cercle formé par les *sonneurs*, et par conséquent avec le nombre de ces derniers.

Pour atténuer cet inconvénient, on divise l'atelier en deux groupes, agissant sur deux câbles attachés au mouton et passant sur deux poulies divergentes.

La manœuvre de la sonnette à tiraudes étant très-fatigante, on ne bat de suite que 25 à 30 coups de mouton; chaque volée exige 3 1/2 minutes, dont 2 minutes environ pour le repos et le temps perdu.

La quantité dont les sonneurs élèvent le mouton varie de 1m20 à 1m50. A la journée de dix heures, on ne peut guère obtenir des ouvriers plus de 125 volées de trente coups; à la tâche, ils donnent jusqu'à dix-huit volées par heure.

A la construction du pont d'Iéna, à Paris, on donnait en moyenne 120 volées par journée, à raison de trente coups par volée. Le poids du mouton était de 587 kil. ; sa levée de 1m45, et le nombre de sonneurs de 38. L'effort par homme se réduisait donc à 15k45 avec une vitesse de 0m145 par seconde, en ne tenant pas compte toutefois du frottement de l'axe de la poulie, de la roideur de la corde maîtresse et de l'obliquité des tiraudes. La levée du mouton était aussi un peu trop forte ; il est bon de la limiter à 1m35.

Un mouton à enfoncer les pilots ne doit pas peser moins de 300 kil.; il est alors manœuvré par dix-huit à vingt hommes. Pour le battage des palplanches, il suffit de donner au mouton un poids de 100 à 200 kil., suivant leur épaisseur et la résistance du terrain.

Dans le cahier des charges concernant les travaux des nouvelles fortifications d'Anvers, le minimum en poids du mouton des sonnettes destinées au battage des pilotis est fixé à 400 kil.

*Sonnettes à déclic.* — Dans les sonnettes de cette espèce, la corde maîtresse, au lieu d'être terminée par des tiraudes, s'enroule sur un treuil ou un tambour, et la chute s'opère instantanément au moyen d'un appareil appelé *déclic*, qui peut présenter diverses dispositions.

Pour cette sonnette, la puissance est donnée par la formule :

$$P = (Q + q + q')\frac{rR'}{r'R}$$

dans laquelle on représente par :

P la puissance agissant sur la manivelle;
Q le poids du mouton;
$q$ la résistance due à la roideur de la corde sur la poulie;
$q'$ la résistance due à la roideur de la corde sur le treuil;
R le rayon de la manivelle;
R′ celui du treuil;
$r$ celui du pignon monté sur l'arbre de la manivelle;
$r'$ celui de la roue d'engrenage montée sur l'arbre du treuil, et qui engrène avec le précédent.

On a négligé, dans cette formule, les frottements des axes et des engrenages.

Ce genre de sonnette est surtout avantageux quand le poids du mouton atteint 500 kil. et au delà, et que la hauteur de chute est supérieure à 1m50.

On a employé avec la sonnette à déclic des moutons de 2,000 à 3,000 kil., et des hauteurs de chute de 4 à 5 mètres. Mais, en général, le poids du mouton ne dépasse pas 1,000 kil., et la hauteur de chute est déterminée de façon à éviter de fendre les pilots.

En moyenne, le prix de revient du battage par la sonnette à déclic

n'est que les 0,65 à 0,70 de celui du battage avec la sonnette à tiraudes.

D'après des résultats d'expérience, l'enfoncement E des pilots est proportionnel au produit de la masse $m$ du mouton, plus la masse $m'$ du pilot, par le carré de la vitesse commune $u$ de ces deux masses après le choc ; l'on a donc, en désignant par $v$ la vitesse du mouton avant le choc :

$$E = (m + m')\, u^2$$

$$E = (m + m') \frac{m^2 v^2}{(m + m')^2} = \frac{m^2 v^2}{m + m'}$$

et comme $v^2 = 2gh$, l'on obtient :

$$E = \frac{2\, g m^2 h}{m + m'} = \frac{2\, gmh}{1 + \frac{m'}{m}}$$

où $h$ représente la hauteur de chute.

L'expression $\frac{2\, g m^2 h}{m + m'}$ fait voir que, pour une même masse de mouton, l'enfoncement d'un même pilot est proportionnel à la levée $h$. L'expression $\frac{2\, gmh}{1 + \frac{m'}{m}}$ montre que, pour un même produit $mh$, l'effet est d'autant plus grand que la masse $m$ est plus grande; il y a donc avantage à prendre de gros moutons, sauf à modérer la hauteur $h$, pour ne pas dépasser la limite que l'on a assignée au produit $mh$ qui représente l'économie du travail. On peut, du reste, pour les derniers coups, augmenter cette hauteur en la portant à 4 ou 5 mètres.

*Battage à la vapeur.* — La vapeur a été utilisée d'abord pour communiquer le mouvement aux treuils ou aux tambours des sonnettes à déclic.

Plus tard, on inventa un appareil d'un emploi plus avantageux, désigné sous le nom de *marteau à vapeur*. Indépendamment d'un battage plus rapide, cette machine offre, sur les sonnettes, l'avantage d'empêcher beaucoup mieux les déviations latérales ; en effet, le choc du marteau à vapeur étant plus considérable que celui du mouton ordinaire, il en résulte que les obstacles accidentels auxquels sont dues les déviations ont une moindre influence. Lorsque les travaux de bat-

tage sont très-importants, il y a économie à substituer aux sonnettes l'action de la vapeur.

Dans les travaux de construction du Pont-au-Change, à Paris, l'on a fait usage, dans ces derniers temps, d'une sonnette dont le mouton était mû directement par la vapeur. La sonnette et la locomobile se trouvaient sur un même bateau, ce qui facilitait le déplacement du système pour le battage des pilots successifs. Le mouton pesait 1,100 kil.; la locomobile, de la force de 6 chevaux, le commandait à l'aide d'une courroie, et il donnait 7 ou 8 coups à la minute.

Une sonnette à déclic ordinaire, dont le mouton pesait 500 kil., ayant été employée simultanément avec la précédente, les pilots enfoncés en un même temps par les deux machines ont été entre eux dans le rapport de 100 à 350, ce dernier nombre correspondant à la sonnette à vapeur. Le nombre d'hommes employés à la manœuvre était le même dans les deux cas. Le battage à la vapeur, tout en procurant une très-grande économie de temps, a encore, paraît-il, été avantageux sous le rapport de la dépense.

*Pilots à vis.* — Ce sont des pilots munis d'un pas de vis à leur partie inférieure; l'enfoncement se produit en appuyant la pointe sur le sol, et en imprimant au pilot un mouvement de rotation à l'aide d'un cabestan.

Ce procédé a été employé fréquemment avec succès et avantage, par MM. *Brunel, Cubitt* et *Stephenson,* dans les fondations de ponts et de viaducs. Il a aussi été appliqué récemment à certains travaux de fondation du chemin de fer de l'Ouest (France).

*Détails d'exécution.* — Lorsqu'il s'agit de battre des pilots inclinés, on incline la sonnette sous l'angle voulu, et on opère le battage comme à l'ordinaire. Dans ce cas, si l'on veut estimer le refus relatif, il faut tenir compte de la perte de force due à l'inclinaison $\alpha$ de l'axe du pilot avec l'horizontale; la puissance sera alors :

$$P \sin. \alpha - fP \cos. \alpha$$

$f$ étant le coefficient du frottement.

Il faut éviter, autant que possible, d'employer des entures, tant à cause de l'incertitude des effets du battage que des chances de déviation et de la moindre rigidité de l'ensemble. Nous avons déjà fait re-

marquer, à propos des pilotis du fort Sainte-Marie, combien la trépidation qui s'exerce à l'enture absorbe de force vive et cause d'incertitude sur la relativité du refus.

Les mêmes inconvénients se présentent dans l'emploi du *faux-pieu;* on ne doit y recourir que dans les cas de nécessité absolue.

L'on donne généralement aux pilots $0^m40$ à $0^m50$ de longueur en sus de celle qui est nécessaire, afin de pouvoir, dans le *recépage,* enlever la partie dégradée par les chocs du mouton. Dans les fondations hydrauliques avec épuisements, le recépage s'opère au moyen d'une scie passe-partout, ou d'une forte scie de charpentier manœuvrée par deux hommes. Lorsqu'il doit s'exécuter sous l'eau, on a recours à des machines plus ou moins compliquées.

*Grillages.* — Le grillage se compose d'un système de poutres recroisées à angle droit, et assemblées entre elles et avec les pilots. On appelle *longrines* les pièces qui s'étendent dans le sens longitudinal; et *traversines* ou *racinaux,* celles qui sont placées en travers, dans la direction des files. On désigne sous le nom de *chapeaux* les longrines ou autres pièces assemblées sur les pilots de rive.

La couche inférieure du grillage s'assemble seule avec les pilots, par tenons et mortaises. Il n'est pas indifférent de la composer soit de traversines soit de longrines; le choix, à ce sujet, est déterminé par les considérations suivantes : 1° d'après les principes de la charpenterie, l'axe longitudinal des mortaises doit être disposé dans le sens de l'axe longitudinal de la pièce de bois dans laquelle elles sont entaillées; 2° il faut placer les tenons des pilots de façon que leur plus long côté soit dans le sens de la poussée supérieure due à l'édifice.

D'après ces conditions, si les pressions se dirigent latéralement à la construction, les traversines doivent former la couche inférieure du grillage et s'assembler aux pilots ; le contraire a lieu quand la tendance au mouvement se trouve dans une direction parallèle aux longrines.

L'assemblage des pilots avec les pièces inférieures du grillage exige une grande main-d'œuvre et des ouvriers exercés; il a aussi l'inconvénient de diminuer la résistance des pièces à la flexion verticale. Aussi, quand les pressions sont peu importantes, on se borne à répartir sur la surface du pilotis au nombre limité d'assemblages à mortaise.

Les longrines et les traversines sont réunies au moyen d'entailles peu profondes, afin de diminuer le moins possible leur solidité (fig. 42).

L'assemblage des racinaux ou des longrines aux chapeaux se fait à mi-bois ou à tiers-bois, avec ou sans renfort.

On emploie le trait de Jupiter, à mentonnets de 4 à 5 centimètres, pour relier entre elles les pièces qui composent un même cours.

Lorsqu'on prévoit que le grillage sera exposé à des sous-pressions assez fortes, comme dans les radiers des écluses et des aqueducs, on perce les mortaises d'outre en outre, en ayant soin d'évaser leur partie supérieure; la mise en joint étant faite, on chasse dans les vides de la mortaise deux coins en chêne pour former queue d'aronde.

Si l'on craint des sous-pressions très-considérables, il est préférable d'entailler directement en queue d'aronde la tête du pilot et la mortaise; dans ce cas, les pièces inférieures du grillage se mettent en joint latéralement, et l'on remplit ce qui reste de l'entaille en queue d'aronde par un tampon taillé de la même façon, que l'on fixe avec quelques clous barbelés.

*Plancher.* — Dans les constructions hydrauliques où les sous-pressions sont peu à craindre, le plancher se compose de madriers assemblés à plat joint et fixés par des clous, des gournables ou des fers barbelés, sur les cours inférieurs du grillage, et serrés contre les pièces des cours supérieurs.

Lorsque les sous-pressions sont fortes et peuvent soulever partiellement le plancher, on consolide celui-ci au moyen de lambourdes placées sur les madriers et reliées au cours inférieur par des boulons ou des étriers. La réunion des madriers entre eux doit alors se faire autrement. A cet effet, les faces de joint étant dressées parfaitement d'équerre sur la moitié de l'épaisseur, on leur donne, sur l'autre moitié, une légère obliquité, afin de ménager un petit joint cunéiforme qu'on emplit de calfat à chaud après avoir brayé et serré fortement les madriers les uns contre les autres.

Dans les cas ordinaires, on donne les dimensions suivantes aux pièces des grillages et des planchers :

Traversines, $0^m20$ à $0^m30$ de largeur sur $0^m25$ à $0^m35$ de hauteur;
Longrines, $0^m20$ à $0^m25$ id. sur $0^m25$ à $0^m30$ id.;

Chapeaux, 0m30 à 0m35 de largeur sur 0m30 à 0m35 de hauteur;

Madriers ou bordages, 0m08 à 0m11 d'épaisseur sur 0m25 à 0m30 de largeur.

*Palplanches.* — Lorsqu'on veut contenir la partie du terrain qui correspond à l'assiette de la construction, et l'empêcher de s'étendre latéralement par l'effet de la pression supérieure, on forme autour de cette partie un coffrage en palplanches jointives consolidées par des châssis d'assemblage. Dans les constructions hydrauliques, le but des panneaux ou files de palplanches est d'empêcher l'eau de pénétrer sous les fondations, et d'y produire des affouillements dangereux pour la stabilité de l'édifice. Ce but est rarement atteint d'une manière absolue par suite des déviations que subissent les palplanches dans le battage. Aussi a-t-on proposé différents modes d'affûtage et d'assemblage latéral, suivant la résistance du terrain à l'enfoncement, et d'après la puissance des eaux à contenir.

Les affûtages les plus simples et les plus employés consistent à tailler le pied en biseau plus ou moins allongé, ou à l'affûter comme on le fait pour les pilots.

Les assemblages des palplanches se font : 1° à plat joint ; 2° en langue de carpe ou grain d'orge ; 3° à gorge ; 4° à queue d'hironde; 5° à rainures et languettes.

Le premier, qui exige le moins de sujétion, s'emploie dans des terrains mous et homogènes. Le deuxième (fig. 43) est considéré comme le meilleur pour les palplanches de faible épaisseur, et l'assemblage à gorge (fig. 44) est préférable quand leur épaisseur atteint 0m15 à 0m20. On reproche à ces trois assemblages d'ouvrir un joint au passage de l'eau, dès qu'il se produit une légère séparation entre les palplanches. Il est facile de voir que cet inconvénient ne se présente pas avec les assemblages à queue d'hironde (fig. 45) ou à languettes (fig. 46); mais on n'emploie guère ces derniers à cause de leur sujétion.

Lorsque le terrain sous les fondations ou sous le grillage est soumis à une forte pression d'eau, il est indispensable de rendre l'encoffrement le plus étanche possible; il faut, à cet effet, calfeutrer les joints et les garnir de mousse, aussi bas qu'on peut atteindre, avant de poser le plancher ou le remplissage entre les têtes des pilots.

Afin de guider les palplanches pendant le battage, de relier et de renforcer les panneaux, on établit, au préalable, des châssis d'assemblage qui se construisent de différentes manières.

Dans le premier système, ces châssis se composent d'une file de pilots plus ou moins espacés, et couronnés par un chapeau contre lequel sont battues les palplanches, dont la tête, après le battage, y est fixée par des clous. Cette disposition est rarement employée, les palplanches n'y étant guidées que d'un seul côté.

Dans la deuxième méthode, la file de pilots est réunie par deux cours de ventrières moisées et boulonnées à la tête des pilots, et entre lesquelles on bat les palplanches.

La troisième disposition, qui est plus coûteuse mais plus sûre que les précédentes, consiste en deux files de pilots battues dans une position légèrement convergente vers la tête, et couronnées de chapeaux ne laissant entre eux que l'épaisseur nécessaire au passage des palplanches.

Ces dernières sont battues successivement et peu à peu, de manière à arriver en fiche à peu près en même temps et sans se quitter.

## APPLICATION MILITAIRE.

### Pilotis d'écluse d'inondation.

L'application que nous allons citer se rapporte aux fondations sur pilotis d'une écluse, à portes en éventail, construite en mauvais terrain dans une des forteresses du pays. Cette construction peut être citée comme exemple des dispositions et des précautions à prendre dans des circonstances analogues.

Les bajoyers et le radier reposent sur un plancher dont la surface se trouve à un certain niveau coté 3,55, excepté aux endroits suivants :

1° sous la tête d'aval, où elle descend à $1^m,00$ plus bas ;

2° sous l'emplacement des portes en éventail ;

3° sous celui d'un barrage à poutrelles ;

4° sous la tête d'amont.

Dans ces trois derniers endroits, elle descend à la cote 2,05.

La longueur de l'écluse se trouve ainsi divisée en 7 compartiments ou coffres, dont 4 ont reçu ultérieurement un remplissage en maçon-

nerie. Ces coffres sont formés par 8 panneaux ou files de palplanches, que l'on a eu soin de battre avant le battage des pilots de l'intérieur, et avant de commencer les déblais correspondant aux remplissages. Cette précaution avait pour but de maintenir et de resserrer le terrain des coffres maintenus au niveau 3,55.

Les pilots ont $0^m,30$ de diamètre mesuré à $0^m,50$ sous la tête. Leur pied est affûté sur une longueur de $0^m,35$ à $0^m,40$, et représente une pointe carrée de $0^m,05$ de côté.

Le battage s'est fait avec une sonnette à tiraudes, munie d'un mouton de 450 kil., la hauteur de chute étant fixée à $1^m,50$. Chaque pilot a été battu au refus, ce dernier n'étant atteint que lorsque l'enfoncement ne dépassait pas $0^m03$ après trois volées, de 30 coups chacune, données de façon qu'il y eût un léger intervalle entre chaque coup et que les cordes des sonneurs fussent bien lâches pendant la chute du mouton. En outre, ces volées d'épreuve n'étaient données que lorsqu'on avait battu tous les pilots environnants dans un rayon de 4 mètres.

Tout pilot battu à $0^m10$ en dehors de la position prescrite était recépé à la hauteur du fond, ou arraché.

Après le battage, tous les pilots ont été recépés à 0,10 au-dessous de la cote à laquelle est fondée la maçonnerie qu'ils portent respectivement.

Les pilots sont en sapin du pays; les palplanches sont en sapin du Nord.

Ces dernières ont $4^m50$ de longueur sur $0^m10$ d'épaisseur, et leur largeur minima est de $0^m30$ Elles sont assemblées entre elles à grain d'orge, de $0^m03$ d'emboîtement. Leurs têtes affleurent les traversines qui leur servent de ventrières, et y sont fixées chacune par 5 clous de $0^m20$ de longueur. Celles qui aboutissent à des pilots carrés pénètrent de $0^m05$ dans des rainures de même profondeur pratiquées dans ces pilots.

Leurs extrémités inférieures sont amincies sur $0^m30$, de façon à n'avoir plus que $0^m03$ d'épaisseur à la pointe; celle-ci est taillée en biseau sur la même longueur et sur un des côtés.

Après le recépage des pilots, il a été taillé à leur tête un tenon dirigé dans le sens transversal, et ayant $0^m30$ de hauteur sur $0^m07$

d'épaisseur. Ces tenons ont été taillés bien d'aplomb sur les épaules des pilots, et celles-ci ont été sciées aussi planes et aussi horizontales que possible afin de présenter un bon appui aux pièces qu'elles supportent.

La terre vaseuse étant enlevée, et remplacée entre les têtes des pilots par une couche de terre glaise ou de béton arasée au niveau des naissances des tenons, chaque file transversale a été couronnée par une traversine, en sapin du Nord, dépassant de 0m50 les pilots extrêmes. Leur équarrissage est de 0m30 de hauteur sur 0m25 de largeur, à l'exception de celles qui servent de ventrières aux palplanches, et qui ont 0m30 de hauteur sur une largeur de 0m35. Elles portent sur les pilots au moyen de mortaises qui ont, sur la face inférieure, les mêmes dimensions que les tenons, mais dont la face supérieure est de 0m08 plus longue ; les deux vides ainsi formés sont remplis par des coins en chêne introduits avec force.

Après avoir étendu entre les traversines une nouvelle couche de béton jusqu'à 0,10 de leur surface supérieure, on les a reliées par des cours de longrines placés au-dessus de chacune des files longitudinales de pilots. Ces pièces, également en sapin du Nord, ont 0m25 sur 0m20 d'équarrissage ; celles qui n'aboutissent pas aux palplanches dépassent de 0m50 le milieu de la dernière traversine.

Les longrines sont assemblées aux traversines (fig. 42) par des entailles de 0m50 de profondeur, faites dans la surface inférieure des premières et dans la surface supérieure des secondes. Les extrémités des longrines qui reposent sur les chapeaux-ventrières des palplanches y sont assemblées à queue d'aronde couverte, avec entaille, dans chaque pièce, de 0m05 de hauteur.

Les cinq cours de longrines situées sous le pertuis sont assujettis aux traversines, à chaque croisement, par un boulon en fer à tige barbelée, de 0m40 de longueur sur 0m025 de côté en carré.

Les cours extérieurs et les croisements sous les chambres des éventails sont fixés de la même manière.

Dans tous les autres croisements du grillage, le boulon en fer est remplacé par une cheville en chêne, de même longueur que le boulon, mais de 0m03 d'équarrissage. Cette cheville a sa tête refendue et serrée dans la mortaise par un petit coin en chêne.

Les ventrières des deux rangées extrêmes de palplanches sont reliées à l'ensemble du grillage par des tirants en fer, composés d'une partie droite de 3m60 de longueur et d'un retour de 0m30 formant équerre sur la ventrière. Leur section est de 0m04 sur 0m03 ; huit se trouvent sous la tête d'amont et cinq sous la tête d'aval. Ils sont attachés aux longrines, chacun par 4 boulons en fer à tige barbelée, de 0m15 de longueur sur 0m02 de côté en carré.

On a relié, en outre, au corps de l'ouvrage, par un tirant semblable mais de 4m50 de longueur, et fixé par 7 boulons : 1° la longrine placée sous chaque aile de la tête d'amont; 2° les deux premières longrines placées sous chaque aile de la tête d'aval.

Les pièces qui composent un même cours de traversines ou de longrines reposent généralement sur 6 pilots, sauf aux endroits où la disposition de l'ouvrage empêche de réaliser cette condition.

Les assemblages bout-à-bout des diverses pièces tombent sur la tête des pilots ; ils sont à trait de Jupiter, avec mentonnets de 4 à 5 centimètres de hauteur, et ont une longueur de 1m40. L'on a eu soin de ne pas disposer dans un même alignement les assemblages des cours successifs.

Chaque assemblage est fortifié par 2 boulons en fer, à tige barbelée, ayant 0m25 de longueur et 0m025 de côté en carré, et par 4 chevilles en chêne de mêmes dimensions.

Le grillage étant achevé, on en a rempli les vides avec du béton jusqu'au niveau supérieur des traversines, puis on a placé sur cette base un plancher en sapin du Nord, de 0m10 d'épaisseur.

Les madriers de ce plancher ont en moyenne 0m30 de largeur, et s'étendent au moins sur 7 traversines, lorsque les dispositions de l'ouvrage s'y prêtent. Les à-bouts arrivent au milieu de ces pièces, et ceux des cours contigus ne se trouvent pas sur la même direction.

Les madriers reposent exactement sur toute la largeur des traversines, et sont fortement serrés tant entre eux que contre les longrines. Chacun d'eux est fixé sur chaque traversine par 3 clous et 2 chevilles en chêne, de 0m25 de longueur.

Le plancher recouvre entièrement les dernières traversines sur lesquelles il repose, ainsi que les têtes de toutes les files intermédiaires de palplanches.

Avant de placer les clous, chevilles et coins, on les a plongés dans le goudron ; les chevilles ont, en outre, été enveloppées d'abord d'un peu d'étoupe.

Les faces des assemblages, ainsi que la surface inférieure du plancher, ont été au préalable goudronnées en deux couches épaisses. Tous les joints des madriers et ceux des assemblages des longrines ont été calfatés et brayés avec soin, et l'on a interposé une couche de mousse ou de gros papier gris entre les traversines et le plancher, entre celui-ci et les têtes des palplanches qu'il recouvre, et dans les assemblages bout-à-bout des longrines.

## FONDATIONS TUBULAIRES.

Les fondations tubulaires, fréquemment employées dans ces derniers temps pour les piles et culées de ponts, sont généralement applicables dans les terrains de vase, d'argile, de sables ou graviers mobiles et indéfinis. Elles présentent surtout de nombreux avantages lorsqu'il s'agit de descendre les fondations à de très-grandes profondeurs sous l'eau.

Ce genre d'ouvrages s'exécute de diverses manières, suivant les circonstances. Les détails suivants, empruntés à M. l'ingénieur *J. Claudel,* donneront une idée complète des perfectionnements successifs apportés depuis quelques années dans la construction des fondations tubulaires.

*Pilots en béton.* — On parvient à donner aux terrains compressibles un certain degré de résistance en y battant des pieux plus ou moins rapprochés, ou en y enfonçant de distance en distance un fort pilot en bois, que l'on retire ensuite, pour remplir l'alvéole qu'il a laissée avec du mortier ou du béton qu'on pilonne fortement. On fait autant de ces pilots en béton que cela est nécessaire pour rendre le terrain résistant, puis on recouvre celui-ci d'une couche de béton bien damé. Lorsque le sol est constamment sec, on peut à la rigueur substituer le sable au mortier ou béton.

La tête du pilot doit être garnie d'une frette en fer, pour résister aux chocs du mouton, et percée d'un trou dans lequel on passe une barre de fer, qui sert, pendant le battage, à remuer et à tourner le

pilot pendant qu'on l'enfonce, de manière à lisser les parois de l'alvéole, et à leur donner une certaine consistance qui permet la pose du béton sans qu'elles s'éboulent; ce mouvement imprimé au pilot le rend facile à retirer quand il est entièrement enfoncé.

Si l'espace occupé par la fondation était très-grand, on pourrait, après avoir consolidé le sol au moyen de pieux en béton, le couvrir d'un massif de sable de $0^m60$ à $0^m80$ d'épaisseur, que l'on forme par couches successives de $0^m15$ à $0^m20$, parfaitement damées et mouillées d'un lait de chaux très-épais; ce massif; que l'on couvre également d'une couche de béton bien pilonné, est incompressible, et offre l'avantage de répartir uniformément la charge sur toute l'étendue de la fondation.

*Colonnes encaissées.* — Pour fonder quelques ponts du chemin de fer de Narbonne à Perpignan, on a fait reposer la base de la pile ou de la culée sur plusieurs colonnes cylindriques. de 3 à 4 mètres de diamètre, construites de la manière suivante.

Sur l'emplacement de la fondation, on fait hors de l'eau, en maçonnerie de briques et ciment, un cuvelage de puits d'un diamètre extérieur égal à celui de la colonne, et d'une épaisseur de $0^m50$ environ. Ce cuvelage s'établit sur un plancher flottant, en bois, et s'immerge par son propre poids. On a soin qu'il s'élève d'un mètre au-dessus de la surface de l'eau, et quand il repose sur le sol, par une disposition particulière on enlève le fond mobile en bois, et on assujettit le cuvelage verticalement. On drague alors à la main le sable et la vase dans cette espèce de puits, en approchant le plus près possible des murs. Le cuvelage s'enfonce progressivement au fur et à mesure qu'on enlève la terre; quand il est descendu de $0^m50$ à $0^m60$, on élève d'autant le dessus de ses murs; on drague de nouveau, et on continue ainsi jusqu'à ce que le pied de la colonne repose sur le sol résistant. On coule alors à l'intérieur une couche de béton de ciment d'environ 1 mètre d'épaisseur, on épuise l'eau, et l'on achève de remplir la colonne avec de la maçonnerie. C'est sur ces colonnes, que l'on établit en nombre suffisant, qu'on pose le socle de la construction.

Pour plusieurs ponts, les colonnes tubulaires, au lieu d'être en maçonnerie, comme nous venons de l'indiquer, sont en tôle ou en fonte, et également bétonnées et maçonnées à l'intérieur, quand,

par le draguage, on les a fait descendre jusqu'au sol résistant.

*Fondations tubulaires à l'aide du vide.* — Un pilot creux, en fonte ou en tôle, ouvert par l'extrémité inférieure et fermé par l'extrémité supérieure, étant placé verticalement sur un sol baigné par l'eau, si l'on y fait le vide à l'aide d'une pompe pneumatique, l'eau se précipite dans l'intérieur en entraînant les parties solides qui se trouvent sous son extrémité, et le pilot s'enfonce graduellement sous l'action de son poids et de la pression atmosphérique sur sa base supérieure. Quand le pilot est rempli d'eau et de débris solides, on le vide, et l'on recommence successivement l'opération jusqu'à ce que le pilot ait atteint le sol résistant. Ce procédé a été employé pour un viaduc de l'île d'Anglesey, au chemin de Chester à Holyhead. La maçonnerie d'une des piles est établie sur une plate-forme en fonte, supportée par 19 pilots en fonte, de 0m037 d'épaisseur et de 0m355 de diamètre extérieur. Quand un pilot était arrivé à la profondeur voulue, on le vidait d'environ 1m80, et on le remplissait de béton. Ces fondations, exécutées en 1847, n'ont éprouvé aucun tassement, quoique la charge supportée soit de plus de 500 tonnes, y compris le poids des trains. Ce procédé n'est applicable que dans les terrains de vase, de sable, de gravier et d'argile.

*Fondations tubulaires par l'air comprimé.* — Un tube en fonte, de 1 à 3 mètres de diamètre, ouvert par le bas et fermé par le haut, étant descendu jusqu'à ce qu'il repose sur le sol, on y comprime de l'air qui chasse l'eau du tube. Des ouvriers s'y introduisent alors, et en creusant le terrain, font progressivement descendre le tube jusqu'à la couche solide. On coule alors au fond du tube un lit de mortier de ciment romain qui s'oppose à l'introduction de l'eau, et, ouvrant le tube à la partie supérieure, on achève de le remplir avec du béton ordinaire ou de la maçonnerie. Pour rendre possibles l'entrée et la sortie des ouvriers, des matériaux et des terres, le tube est muni à sa partie supérieure d'une chambre, dite *chambre à air* ou *d'extraction*, percée de deux portes, qui la mettent en communication, l'une avec l'air extérieur, et l'autre avec l'intérieur du tube. Pour accélérer le travail, on a garni chaque tube de deux chambres à air.

Au pont de Rochester, les tubes en fonte, composés d'anneaux boulonnés entre eux à l'aide de brides intérieures, ont 1 mètre de

diamètre ; il y en a 8 pour chaque pile. Au grand pont de Mâcon, sur la Saône, les tubes en fonte ont 3 mètres de diamètre, et il n'y en a que 3 pour une pile ; ils descendent à une profondeur de 15 mètres au-dessous du niveau de l'eau. La dépense a été de 87,000 francs par pile.

A des profondeurs qui dépassent 25 mètres sous l'eau, la pression de l'air est telle, que les ouvriers ne peuvent plus y résister.

Pour le pont de Kehl, M. *Fleur-Saint-Denis*, ingénieur principal au chemin de l'Est, a appliqué la méthode précédente, mais en la modifiant afin de la rendre à la fois plus expéditive et plus économique. Pour descendre les fondations à 20 mètres de profondeur au-dessous de l'étiage, ou à 22 mètres environ au-dessous des eaux moyennes, dans un sol de gravier indéfini et très-mobile, au lieu de cylindres en fonte s'élevant dans toute la hauteur de la fondation, on a employé 4 énormes caissons rectangulaires, en tôle, de 7 mètres de longueur (largeur de la fondation), et de 5$^{m}$80 de largeur, juxtaposés à la suite les uns des autres pour former toute la longueur de la fondation.

Le couvercle de chaque caisson porte en son milieu une cheminée d'extraction en tôle, de 1$^{m}$50 de diamètre, ouverte à ses deux extrémités ; cette cheminée s'élève jusqu'au-dessus de la surface de l'eau, et descend à travers l'intérieur du caisson jusqu'au niveau des bords inférieurs. Dans cette cheminée, constamment remplie d'eau, se meut une noria ou drague, dont les godets viennent creuser le sol au centre du caisson où des ouvriers poussent le gravier de toute l'étendue de ce dernier. Sur la largeur de la fondation, chaque caisson porte deux autres cheminées en tôle, de 1 mètre de diamètre, ouvertes par le bas au niveau du couvercle du caisson, et garnies à leur partie supérieure d'une *chambre* ou *écluse à air*, pour l'entrée et la sortie des ouvriers.

Les 4 caissons étant descendus sur le sol, à l'emplacement de la fondation, on foule de l'air dans les deux cheminées latérales, au moyen d'une pompe, jusqu'à ce qu'il n'existe plus d'eau, ni dans ces cheminées ni dans les caissons. Les ouvriers descendent alors à leur travail, et l'on met les dragues en marche.

Pour la première pile, on a élevé, au-dessus des parois latérales des caissons, une caisse en bois dans l'intérieur de laquelle on a coulé

du béton, au fur et à mesure de la descente du travail. Ce béton formait le corps de la pile autour des cheminées, en même temps qu'il chargeait le système et l'obligeait à descendre. Les caissons étaient, du reste, suspendus à des verrins servant à régler la descente. Arrivés à la profondeur voulue, on les a remplis de béton et de maçonnerie, ainsi que les vides circulaires laissés par les cheminées, et l'on a réemployé celles-ci pour les autres piles.

Pour les 3 dernières piles, on a supprimé la caisse en bois; on s'est contenté d'élever sur les caissons en tôle, au fur et à mesure de leur descente, un massif continu de maçonnerie, parementé en libages ou en moellons smillés; on a aussi supprimé les cheminées centrales en tôle, en se bornant à parementer en briques les parois du puits contenant la drague; enfin, on a réuni d'une manière invariable les caissons d'une même pile, et l'on a établi entre eux des communications qui ont facilité beaucoup le travail, en permettant aux ouvriers d'aller d'un caisson dans un autre, selon les besoins du travail.

## FONDATIONS PAR CAISSONS FONCÉS.

Pour faire usage de ce genre de fondations, il est indispensable d'enlever d'abord la couche de mauvais terrain, au moyen de la drague, du scaphandre, ou d'autres machines que nous examinerons plus loin, puis de niveler convenablement le sol sur l'emplacement voulu.

Si la couche compressible est très-puissante, on consolide à l'avance le fond par un pilotis, recépé dans un plan bien horizontal.

D'autres fois, on coule au préalable une couche plus ou moins épaisse de béton, que l'on a soin de niveler à la partie supérieure.

Ce premier travail exécuté, on construit sur chantier et on met à flot au moyen de barils vides, une forte caisse en bois, munie d'un fond solide, et complétement étanche. Le caisson étant amené à l'endroit où il doit être échoué, et maintenu exactement dans la position convenable par des amarres et des ancrages, on établit sur le fond en bois la maçonnerie de l'ouvrage, que l'on monte par assises. L'ensemble finit par s'enfoncer jusque près du sol par le poids de la maçonnerie; alors, afin de diriger convenablement l'échouage, on laisse pénétrer plus ou moins l'eau dans le caisson. On continue à monter

la maçonnerie jusqu'à ce qu'elle dépasse le niveau du liquide, puis on enlève les parois latérales qui ne sont généralement retenues que par des tirants.

La charpente du fond du caisson se construit à claire-voie, lorsque l'échouage a lieu sur le sol ou sur un massif de béton ; elle est faite jointivement, quand le caisson repose sur les têtes d'un pilotis.

La construction à claire-voie consiste ordinairement en un cadre de chapeaux fortement reliés entre eux, dans lequel s'assemblent un certain nombre de traversines. Sur ou sous ces dernières pièces, et quelquefois des deux côtés, on cloue des bordages ou madriers, assemblés comme ceux des planchers des pilotis, et calfatés avec soin.

Parfois, les traversines sont jointives et reliées par de longs boulons espacés de $0^m70$ à $1^m00$; leurs joints sont encore calfatés. L'on supprime alors le tablier, et il devient inutile de boulonner chaque traversine aux chapeaux, comme on doit le faire dans le cas précédent.

Dans la construction du pont du Val-Benoît sur la Meuse, on a adopté, pour le fond des caissons, un système tout aussi solide que ceux que nous venons de citer, et plus économique en ce qu'il n'exige que des bois d'un faible échantillon. Ces fonds étaient composés de trois couches de gros madriers en chêne, reliées par un chevillage général en gournables ou chevilles en chêne, de $0^m05$ de diamètre; les madriers étaient croisés à angle droit, et assemblés jointivement dans chaque couche.

L'épaisseur totale du fond était de $0^m50$, dont $0^m10$ pour la couche supérieure, et $0^m20$ pour chacune des deux autres.

Les madriers avaient en moyenne $0^m50$ de largeur, et étaient, autant que possible, d'une seule pièce dans la longueur et la largeur des caissons. Les joints de chaque couche étaient calfatés avec soin.

Les parois latérales des caissons doivent satisfaire à deux conditions : 1° être assez solides pour résister à la charge d'eau qui les presse extérieurement, et qui augmente au fur et à mesure que l'ensemble s'enfonce; 2° pouvoir aisément se démonter et s'enlever, lorsque les maçonneries sont montées au-dessus des marées hautes.

Ces conditions ont été réalisées de différentes manières. Nous citerons, comme exemple, le système qui a été employé pour les caissons du pont d'Ivry près Paris, et dont on fait un fréquent usage.

Ce système comprend : 1° une série de montants verticaux *abcd*, (fig. 47), assemblés par le pied dans les chapeaux du fond, et munis de rainures verticales sur leurs deux joues ; 2° des panneaux en madriers, maintenus par des traverses verticales *mn* et des écharpes *st*, et s'assemblant dans les rainures des montants et dans celles qui sont entaillées dans les chapeaux inférieurs. L'ensemble est maintenu par un gitage *ee*, *ff*, dont les extrémités sont reliées aux chapeaux par des tire-fonds *gg* en fer.

## FONDATIONS PAR ENCAISSEMENTS.

Le mode de fondation par encaissement est généralement préféré au précédent à cause de sa simplicité et de son prix modéré. Il consiste, dans les terrains ordinaires, à former autour de l'emplacement déterminé une enceinte de pilots et de palplanches assez rapprochées pour ne pas permettre au béton de fluer au dehors ; à draguer dans cette enceinte, jusqu'à ce que l'on arrive à un sol assez incompressible, et à la remplir de béton, sur lequel on élève la construction.

Si le fond du lit est composé de roches dans lesquelles il est impossible d'enfoncer des pilots, on a recours aux encaissements échoués. Ceux-ci consistent en caissons sans fond, construits sur chantier, et dont les parois sont formées de montants et de solides vannages, le tout consolidé et maintenu par plusieurs cours de moises horizontales.

La première opération à exécuter dans ce dernier cas, c'est un sondage exact ayant pour but de relever le profil du fond ; la connaissance de ce profil permet de tailler le bord inférieur des parois du caisson de manière qu'il s'applique sur les inégalités du sol relevées par le sondage. Cependant, il est prudent d'assembler les bordages de manière à pouvoir les faire glisser légèrement entre les moises.

Dans ces derniers temps, on a fait usage d'encaissements en tôle ; mais ils ont l'inconvénient d'être plus coûteux que ceux en bois.

Il n'est pas nécessaire que l'encaissement soit étanche jusqu'au fond ; il suffit de réaliser cette condition dans la partie supérieure à partir du niveau où l'on doit exécuter la maçonnerie proprement dite. On commence généralement par couler sous l'eau, dans le cais-

son, une couche de béton plus ou moins épaisse qui arrive jusqu'au niveau précité; puis, on épuise l'eau restante au moyen des machines ordinaires ou de locomobiles.

Le caisson suivant a été employé avec succès au pont Saint-Michel, à Paris. On peut le prendre comme type pour tous les cas où l'épaisseur de la vase ou du gravier mouvant n'est pas trop grande, et lorsque le fond solide ne se trouve pas à plus de 5 ou 6 mètres sous le niveau de l'eau. Pour des profondeurs plus fortes, il serait nécessaire d'augmenter l'équarrissage des pièces, ainsi que le nombre de poteaux et de moises.

Ce caisson se compose essentiellement : 1° d'une ossature formée de poteaux montants reliés par trois cours de moises horizontales; 2° d'une cloison en palplanches destinée à retenir le béton.

L'inclinaison des parois est de 1/5 environ.

Les poteaux sont en chêne; leur espacement d'axe en axe est de 2 mètres, et leur équarrissage est de $0^m16$ de côté. Les trois cours de moises, qui ont $0^m20$ sur $0^m25$ de section, sont légèrement entaillés au droit des montants, auxquels ils sont fixés par des boulons. Les deux cours inférieurs sont en chêne; mais le cours supérieur, qui a été enlevé après la pose des premières assises de la pile, est en sapin. Les palplanches, aussi en sapin, sont des madriers de $0^m08$ sur $0^m22$, espacés de $0^m05$ par des tasseaux cloués sur leurs tranches, et entaillés en coin à leur pied pour faciliter leur placement ainsi qu'une faible pénétration dans le sol.

Avant la pose des palplanches, on fixe intérieurement, sur les poteaux, entre les deux cours supérieurs de moises, des planches jointives de $0^m03$ d'épaisseur, dont on recouvre les joints par des voliges garnies de mousse, afin d'obtenir un bordage étanche dans le haut, depuis le niveau inférieur des maçonneries. La mousse se fixe d'abord aux voliges au moyen de terre glaise.

Ce caisson se monte sur place; on le descend au fur et à mesure de sa construction, en le soutenant par des tonneaux vides lorsque le niveau varie avec les marées, ou, dans le cas contraire, par des chèvres placées sur des bateaux ou des radeaux.

Au pont Saint-Michel, le caisson était soutenu par quatorze chèvres établies sur quatre bateaux. Les poteaux ont d'abord été assemblés

au cours inférieur de moises, situé à $0^m80$ du bout des poteaux. On a descendu l'ensemble, jusqu'à ce qu'en faisant flotter les madriers du deuxième cours, on pût les mettre en place. On a ensuite ajusté les moises du cours supérieur. Le cours du milieu est à $1^m80$ de celui du bas, et à $2^m20$ de celui du haut. Ce travail terminé, on a placé le bordage étanche entre les deux cours supérieurs de moises; puis, en chargeant le caisson avec des moellons, on l'a fait descendre jusqu'au fond de la fouille, préalablement draguée et nivelée sous la partie compressible. Les palplanches étant ensuite placées, et légèrement enfoncées dans le sol, on a formé un enrochement autour du pied du caisson; et lorsque la hauteur de cet enrochement a atteint $1^m00$, on l'a continué en utilisant les pierres qui avaient servi à l'échouage.

On a commencé alors à couler le béton, à l'aide de caisses demi-cylindriques cubant $0^{m3}650$. Le massif étant élevé à $0^m50$ en contre-bas du niveau de l'eau, on a épuisé celle-ci au moyen de pompes mues par des locomobiles, puis on a commencé la maçonnerie. Lorsqu'elle a dépassé d'une quantité convenable le niveau de l'eau, on a enlevé le cours supérieur de moises, puis on a scié ces dernières ainsi que les poteaux au niveau du béton.

## APPAREILS SOUS-MARINS.

On se sert de divers appareils, soit pour exécuter des travaux sous l'eau, soit pour vérifier l'état du fond de la mer avant de procéder à l'exécution des fondations. Les plus importants et les plus fréquemment employés sont les suivants.

*Cloche à plongeur.* — Cette machine consiste en une sorte de cuve renversée, fermée sur toutes les faces sauf par le bas, et dans laquelle des hommes peuvent travailler à des profondeurs considérables sous l'eau. Une pompe foulante sert à y renouveler l'air, et à permettre ainsi aux ouvriers d'y séjourner pendant plusieurs heures.

Les cloches à plongeur et les appareils qui en dépendent sont souvent portés sur des pontons, rarement sur des échafaudages.

Telle qu'elle a été perfectionnée par *Rennie,* et telle qu'elle est encore employée en Angleterre, la cloche à plongeur a la forme d'un parallélépipède, de $1^m38$ de largeur moyenne; sa hauteur est de $1^m85$

extérieurement sur 1m72 à l'intérieur. On la coule en fonte d'un seul jet, en laissant au sommet une ouverture communiquant avec l'intérieur par plusieurs trous circulaires, qui se ferment par des soupapes en cuir s'ouvrant de haut en bas. Un fort tuyau en cuir, vissé sur l'ouverture extérieure, s'élève jusqu'à la pompe foulante placée sur l'échafaud ou le bâtiment d'où l'on manœuvre la cloche ; celle-ci est suspendue à de fortes chaînes, qui sont engagées dans des anneaux en fer emprisonnés dans le corps de la cloche au moment de la fusion.

L'intérieur est éclairé par 12 lentilles circulaires, en verre très-épais, solidement fixées par des écrous et du mastic sur le pourtour de la face supérieure.

Cette cloche contient aisément deux personnes assises sur des siéges convenablement disposés. Son poids est d'environ 4,000 kilogrammes.

La pompe foulante qui fournit l'air pur doit renouveler 4 à 5 mètres cubes d'air par heure et par homme, afin que l'atmosphère intérieure ne contienne pas plus de 5 pour cent d'air vicié; celui-ci étant plus chaud, s'accumule au haut de la cloche, d'où on l'expulse au moyen d'un robinet.

*Bateau-plongeur.* — Pour extraire des pierres qui gisaient au fond du port de Cherbourg, on a employé un appareil que son inventeur, M. le docteur *Payène,* a appelé bateau-plongeur. Sa forme se rapproche de celle d'un bateau, et il est divisé, par des cloisons à peu près verticales, en trois compartiments, dont celui du milieu est divisé en outre en deux chambres par une cloison horizontale; celle-ci est munie d'une porte qui permet aux ouvriers de passer de l'une des chambres dans l'autre; la chambre inférieure est sans fond.

Avant l'immersion, on comprime de l'air dans les compartiments extrêmes, et les plongeurs s'enferment dans la chambre supérieure. Cela fait, on foule de l'eau dans les compartiments extrêmes, dont l'air se rend dans la chambre intermédiaire supérieure, et, par suite de l'augmentation de poids due à cette eau, l'appareil s'immerge progressivement. Lorsqu'il touche le fond, on ouvre la porte de la cloison horizontale ; l'air comprimé refoule alors l'eau de la chambre inférieure, et les ouvriers y descendent pour travailler.

On maintient l'air de l'appareil à l'état respirable en le faisant passer, à l'aide d'un fort soufflet, dans une dissolution alcaline. La

tuyère de ce soufflet est garnie d'une pomme d'arrosoir, qui, en divisant l'air en petits filets, le met mieux en contact avec la dissolution qui absorbe son acide carbonique.

*Hydrostat sous-marin.* — Cet appareil, dû aussi à M. Payène, a été employé au creusement du port de Fécamp. Il consiste en une caisse en tôle divisée en trois locaux par deux cloisons horizontales.

Le rez-de-chaussée, ou chambre de travail, a pour aire le fond de la mer; il mesure 8 mètres de côté sur 2 mètres de hauteur, de sorte que 30 à 35 hommes peuvent y travailler aisément.

Le premier étage, qui a les mêmes dimensions que le rez-de-chaussée, est divisé par des cloisons verticales en 4 compartiments, munis chacun d'un robinet qui s'ouvre sur une galerie. Un cinquième robinet, ayant le débit des 4 autres, fait communiquer cette galerie avec l'extérieur.

Le second étage n'a que 5 mètres de côté. Six ou huit manœuvres s'y tiennent pendant le travail, et sont chargés d'y arrimer les matières extraites ou de faire passer dans le rez-de-chaussée les matériaux et outils nécessaires. La communication est établie entre cet étage et le fond par une bure ou puits carré, de 1$^{m}$20 de côté, qui traverse le premier étage.

Une pompe à deux corps, aspirante et foulante, est placée dans l'étage supérieur, et son tuyau d'aspiration débouche à l'extérieur de l'hydrostat, tandis que son tuyau de refoulement aboutit dans la galerie du premier étage dont il a été fait mention.

Au moment de la descente de l'appareil, les ouvriers sont enfermés au deuxième étage, et la porte du puits placée au rez-de-chaussée est hermétiquement fermée. Le fond est rempli d'eau, et les deux étages ne contiennent que de l'air.

Après avoir ouvert les 4 robinets des compartiments du premier étage, on met la pompe en mouvement. L'eau extérieure, aspirée par la pompe, arrive dans la galerie et pénètre par les 4 robinets dans les compartiments précités, où l'air se trouve ainsi comprimé.

Après avoir ouvert un nouveau robinet qui met la galerie du premier étage en communication avec le rez-de-chaussée, on continue à manœuvrer la pompe. L'air comprimé, trouvant une issue, s'échappe des compartiments d'où il est sans cesse refoulé par l'eau, et vient à

son tour repousser l'eau du rez-de-chaussée ; il arrive un instant où le premier étage se trouve plein d'eau et le rez-de-chaussée rempli de l'air provenant de ce dernier local.

On arrête alors le jeu de la pompe ; on ferme les robinets ; on ouvre la porte inférieure du puits, et les ouvriers descendent par ce chemin pour commencer le travail.

Des moyens inverses servent à faire remonter l'hydrostat.

*Scaphandres.* — Les divers appareils qui portent ce nom ne diffèrent entre eux que par les détails. Le scaphandre se compose en général d'un vêtement en caoutchouc, terminé par un casque en verre ou en métal percé de trous, qui recouvre la tête du plongeur et lui permet de voir suffisamment pour travailler au fond de l'eau. Un tuyau flexible en cuir s'ajuste à la base du casque d'une part, et de l'autre sur une pompe foulante qui injecte l'air nécessaire à la respiration du travailleur.

Le scaphandre inventé par M. *Siébe,* et qui est employé avec succès dans quelques ports de France, entre autres à Marseille, pour visiter et restaurer les fondations des ouvrages maritimes, se compose des objets suivants :

1° une pompe à air, du poids de 125 kil. environ ;

2° un vêtement imperméable en caoutchouc, d'une seule pièce, qui part du milieu du dos et couvre tout le corps en formant un pantalon à bas ;

3° un vêtement complet en laine et des souliers plombés ;

4° une épaulière en métal, dont le collet circulaire porte un pas de vis, et la partie inférieure un système de bandelettes en cuivre, et qui sert à fixer le haut du vêtement imperméable ;

5° un casque en métal, de forme ovoïde, dont la hauteur est de $0^m35$ et la largeur de $0^m27$. La partie inférieure du casque est ouverte à la hauteur du col, et porte un écrou qui s'adapte au pas de vis de l'épaulière, dans le but d'établir la réunion du casque au vêtement en caoutchouc. La face du casque est garnie, à la hauteur des yeux, de deux carreaux fixes, de $0^m13$ de diamètre, en verre très-épais. A la hauteur de la bouche, se trouve un carreau mobile, de même diamètre que les précédents, qui est placé dans un châssis en métal formant le pas d'une vis dont l'ouverture du casque consti-

tue l'écrou. De petites grilles en métal protégent les carreaux.

Le conduit d'aspiration d'air pur et celui de décharge de l'air vicié sont formés, à l'intérieur du casque, par de petits canaux placés autour des carreaux en verre. L'air pur arrive par le dessus et le derrière de la tête; à cet effet, le casque est muni d'un pas de vis qui reçoit l'écrou d'un tuyau en caoutchouc de 0m035 de diamètre ; la pompe foule de l'air pur par ce tuyau, et l'air vicié sort par une soupape placée sur le derrière du casque, et dont la jonction est établie de façon à empêcher la rentrée de l'eau.

*Encaissement à revêtir.* — D'après MM. *Vicat* et *Féburier*, le moyen le plus efficace pour préserver de l'action destructive exercée par l'eau de mer sur certains mortiers hydrauliques, consiste à exécuter, sur le parement des ouvrages construits en mortier douteux, des rejointoiements ou des revêtements de 0m05 à 0m10 d'épaisseur, avec des ciments reconnus inattaquables, tels que ceux de Vassy ou de Parker.

L'exécution de ces travaux préservatifs, assez simple pour des constructions neuves en voie d'exécution, présentait, pour la restauration des anciennes constructions, des difficultés qui se sont aplanies par l'invention de l'encaissement à revêtir et par l'usage du scaphandre; c'est ce qu'ont démontré les revêtements sous-marins en ciment de Vassy, exécutés par M. *Gariel* dans les ports de la Méditerranée, en France et en Algérie.

L'encaissement à revêtir est formé de deux poteaux en bois, d'une longueur supérieure à la profondeur de l'eau, et espacés d'environ 2m00 d'axe en axe. Ces poteaux sont réunis à leur partie inférieure par une traverse horizontale, et le long de chacun d'eux est fixée une tige en fer de 0m015 de diamètre. La paroi de l'encaissement, destinée à former le parement du revêtement, se compose d'une série de madriers en chêne, de 0m035 d'épaisseur et 0m25 à 0m30 de largeur, dont chacun est garni à ses extrémités d'un piton à vis qui, en glissant le long des tiges en fer, permet aux madriers de se superposer sur toute la hauteur des poteaux, en formant une surface unie.

Avant de poser l'encaissement, on procède à la préparation des surfaces à revêtir ou des parois des affouillements à remplir. A cet effet, on commence par les dépouiller des mousses, lichens et autres

excroissances, au moyen de longues barres à mine appointées, et de balais ou de brosses en chiendent adaptés à des manches assez longs pour atteindre le fond de l'eau. Puis, on déblaie, à l'aide de râteaux ou de dragues, les résidus du travail précédent accumulés au pied de l'ouvrage.

On descend alors dans l'eau la ferme de l'encaissement, après avoir lesté la traverse inférieure par des débris de moellons maintenus sur des planches, fixées contre les poteaux du côté opposé au revêtement à exécuter. La charpente doit être amenée de façon que, lorsque les madriers seront en place, leur face intérieure coïncide avec le parement que l'on veut obtenir; elle est ensuite fixée au moyen d'amarres. Lorsque le parement a partout la même épaisseur, on pose tous les madriers de l'encaissement; dans le cas contraire, ou bien, s'il y a des vides à remplir, on ne pose qu'un madrier à la fois, ou deux selon les circonstances, et on fait successivement les parties correspondantes du revêtement.

Le remplissage entre l'encaissement et le mur, c'est-à-dire l'exécution proprement dite du revêtement, se fait à l'aide d'un outil particulier désigné sous le nom de *pelle à couler*. Cet instrument se compose d'une lame de tôle emmanchée, de $0^{m}45$ de côté, qui se relève sous un certain angle à partir de la moitié de sa longueur environ, et qui est garnie d'une joue en retour d'équerre le long d'une arête longitudinale. Ce relèvement de l'extrémité de la joue suffit pour maintenir sur la pelle les matériaux que l'on descend dans l'encaissement. La saillie de la joue, augmentée de l'épaisseur du manche, doit être égale à l'épaisseur la plus faible du revêtement, afin que la pelle puisse circuler partout avec la plus grande charge possible. La pelle à couler est garnie d'un pilon, dont le manche a la même longueur que celui de la pelle; ce dernier doit sortir de $1^{m}50$ au moins hors de l'eau, lorsqu'on travaille au fond de l'encaissement.

La pelle étant disposée horizontalement, l'ouvrier la garnit de mortier de ciment et de cailloux concassés, en couvrant, sur toutes les faces vues, cette espèce de béton par un enduit de $0^{m}02$ d'épaisseur arasant la joue de la pelle. Ce garnissage de l'outil doit se faire lestement, attendu que le ciment de Vassy commence à prendre après une couple de minutes. On descend ensuite la charge verticalement et

avec précaution entre l'encaissement et le mur, en faisant glisser le manche contre les madriers. Lorsqu'elle est arrivée à profondeur, l'ouvrier incline le manche vers lui, de manière à rendre l'extrémité de la pelle à peu près verticale; celle-ci étant alors légèrement soulevée, le contenu s'en détache facilement; à l'aide du pilon on le régularise, et on le fait adhérer à la paroi du mur ainsi qu'à la partie de parement déjà exécutée. Le pilon doit être manœuvré avec soin, afin de ne pas délayer le mortier; on parvient ainsi à ne produire qu'une faible quantité de laitance avec un mortier très-gras, composé de trois parties de chaux de Vassy pour deux de sable.

Quand l'encaissement est garni jusqu'au niveau de l'eau, on le déplace pour exécuter la partie adjacente du revêtement.

Ce genre de travail, quoique très-difficile, marche avec célérité lorsqu'on emploie des ouvriers exercés. L'atelier se compose d'ordinaire de 5 à 6 dégradeurs, 2 plongeurs, 3 poseurs, 3 gâcheurs de ciment, et 2 ou 3 manœuvres; composé d'ouvriers habiles, un tel atelier peut exécuter, en une journée de 12 heures, 5 à 6 mètres carrés de revêtement; ce qui correspond à deux longueurs d'encaissement lorsque la profondeur d'eau varie de $2^{m}00$ à $2^{m}50$.

# CHAPITRE DIXIÈME.

## AQUEDUCS ET SIPHONS.

---

### AQUEDUCS.

*Description raisonnée.* — Les aqueducs maritimes ne diffèrent des aqueducs ordinaires, dont nous parlerons dans la *Troisième partie,* que par leurs dimensions, qui sont généralement plus fortes, et par les précautions nombreuses que l'on est obligé de prendre pour éviter les affouillements que tendent à produire des pressions d'eau parfois considérables.

Les aqueducs se construisent à ciel ouvert, ou à l'aide de galeries souterraines percées au fond d'un certain nombre de bures ou puits verticaux aboutissant extérieurement aux piédroits.

Ce dernier procédé, qui est très-simple dans la construction des aqueducs ordinaires de faible section, devient souvent fort difficile lorsqu'il s'agit de grands aqueducs alimentés par les marées. Le principal obstacle que l'on rencontre dans ce dernier cas consiste dans les *fondis,* ou éboulements plus ou moins puissants qui se communiquent de proche en proche et de bas en haut jusqu'à la surface du sol, où ils se manifestent par de grands enfoncements coniques. En présence de ces éboulements, il devient souvent impossible de repercer une galerie et de construire la voûte en les déblayant, soit par le bas, soit par le haut, avec des puits latéraux, ou des échafaudages et des treuils établis sur l'enfoncement; les eaux des pluies qui s'écoulent dans le trou conique supérieur facilitent le glissement des parties latérales, et les terres tendent à prendre le talus naturel.

Au canal souterrain du Tronquoy (France), sous une hauteur de terrain de 40 mètres, on a éprouvé un fondis qu'on s'est obstiné à vider; or, au fur et à mesure qu'on déblayait, il se produisait des éboule-

ments successifs qui le remplissaient de nouveau. On y a travaillé pendant plus de trois ans, et il a été question de changer la direction du souterrain parce qu'on désespérait d'en venir à bout (1).

Un grand nombre d'expériences attestent la différence énorme qu'il y a, au point de vue des difficultés, entre percer une galerie de 1m30 à 1m50 de largeur et ouvrir un souterrain de plusieurs mètres d'ouverture.

Ainsi, dans l'argile de Vaugirard, on perce des galeries qui tiennent bien tant que leur largeur ne dépasse pas 1m30; et cette dimension peut aller jusqu'à 2m00 dans l'argile de Roubaix.

Dans la craie fendillée, ou Craon, de Saint-Quentin, on creusait facilement des galeries sans étançonner, pourvu qu'on ne dépassât point 1m50 en largeur; tandis qu'il était impossible de porter cette largeur à 3m00, même au moyen des plus forts châssis.

A la rigole de Torcy, construite dans des masses séparées de grès de médiocre grosseur, on donna facilement une largeur de 1m60; mais, lorsqu'on voulait l'augmenter seulement d'un mètre, les masses se détachaient, les étais cassaient, et il se produisait des fondis de 20 à 25 mètres de profondeur.

Au point de vue de l'économie, le procédé le meilleur consiste à attaquer l'aqueduc par ses extrémités; l'on évite ainsi les épuisements; mais le travail est long, à cause du petit nombre d'ouvriers que l'on peut mettre à l'œuvre. Du reste, cette marche peut encore présenter les plus grandes difficultés. Nous citerons, comme preuve, ce qui s'est présenté dans la construction du souterrain du canal de Charleroi à Bruxelles.

Ouvert dans une masse de sable, sur 5m60 de largeur et à 36 mètres au-dessous du faîte, il avait été entamé par ses deux extrémités, et le travail marchait avec facilité, lorsqu'on rencontra une veine mince de sable boulant qui arrêta les travaux.

Tant qu'il y avait eu une épaisseur de 0m40 à 0m50 de bon terrain, sable ferme, entre l'extrados et le petit banc d'eau et de sable vif formant sable boulant, le percement avait marché avec succès quoique lentement; mais, dès que l'eau put se frayer un passage à travers le toit de la galerie, elle entraîna le sable, qui ne cessa d'arriver au fur et à mesure qu'on déblayait. On essaya vainement de continuer la

(1) Minard, *Cours de constructions hydrauliques.*

galerie à l'aide d'un mantelet analogue à celui qui fut employé au percement du tunnel sous la Tamise, et l'on en fut réduit à exécuter la voûte à ciel ouvert, par longueurs de 10 mètres à la fois.

La voûte, de $0^m70$ d'épaisseur, éprouva en quelques endroits des tassements très-notables sous l'action des remblais élevés dont on la chargeait; aussi, fut-on obligé d'augmenter son épaisseur, sur certaines parties, et de la porter jusqu'à cinq rouleaux de briques, ou environ $1^m16$.

M. Minard rapporte qu'ayant été chargé, en 1802 et 1803, de l'étude et du projet de ce canal, il avait reconnu, par des puits et des sondages, l'existence de la couche mince de sable délayé; et que, par suite, il avait proposé de donner $1^m50$ d'épaisseur à la voûte, aux points où la galerie rencontrait ce mauvais terrain.

L'exemple que nous venons de citer prouve évidemment la nécessité de tenir compte du poids des remblais, lorsque les aqueducs sont exécutés à ciel ouvert.

Il n'en est pas de même pour ceux qui sont construits au moyen de galeries souterraines, à des profondeurs parfois considérables. Par suite de la cohésion des terres, celles-ci n'exercent généralement qu'une poussée très-faible, excepté toutefois dans les terrains mobiles, dont le sable boulant est le plus mauvais.

L'expérience fait voir que l'épaisseur des voûtes dépend alors de l'ouverture et de la forme de l'aqueduc, ainsi que de la densité et de la mobilité des couches que l'on traverse.

En voici quelques exemples.

| CANAUX SOUTERRAINS. | OUVERTURE. | ÉPAISSEUR DE LA VOUTE. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|
| Aqueduc de Torcy (France). | $2,^m60$ | $0,^m45$ | Dans un fondis. |
| Id. de Soussey (Id.). | $2,^m00$ | $0,^m34$ | Id. de marne et argile schisteuse. |
| Id. de Noirieu (Id.). | $1,^m50$ | $0,^m22$ | Id. de Craon ou craie meuble. |
| Id. des Salines (Id.). | $2,^m60$ | $0,^m50$ | Voûte en ogive. |
| Canal de Charleroi (Belgique). | $4,^m30$ | $0,^m70$ | Glaise, sable boulant (fig. 48). |
| Id. Great-Trunk (Angleterre). | $4,^m20$ | $0,^m45$ | Sable coulant. |

Il paraît que, dans les terrains les plus défavorables, on peut donner aux voûtes de soutènement les épaisseurs suivantes :

0m70 à 0m90 pour 5 à 6 mètres d'ouverture ;
0m45 pour 2 à 3 mètres d'ouverture;

et dans les terrains de consistance moyenne :

0m45 à 0m60 pour les grandes sections ;
0m34 ou un rouleau et demi, pour les petites.

Dans les terrains forts, ou qui ont subi leur tassement, l'épaisseur peut même être réduite, dans quelques cas favorables, à 0m21 ou 0m22, c'est-à-dire une brique.

La forme adoptée généralement pour les voûtes des aqueducs est le plein cintre, rarement l'arc de cercle ou l'anse de panier.

Au canal souterrain de Thames et Medway, pour mieux suivre la forme naturelle des excavations, on a adopté, selon les circonstances, la voûte surbaissée, le plein cintre et l'ogive.

Au souterrain du canal de Charleroi et à celui du Great-Trunk, afin de donner plus de force aux piédroits et par économie, on a composé la section intérieure de plusieurs arcs, qui forment avec la voûte et le radier une courbe fermée plus ou moins elliptique. Dans le but d'éviter une profondeur inutile, la partie inférieure est un peu aplatie ; le radier est en voûte renversée (fig. 48).

Lorsque les maçonneries des aqueducs sont exécutées à ciel ouvert et dans des terres de consistance moyenne, on peut déterminer l'épaisseur des voûtes au moyen de la formule empirique suivante, que M. Perronet a déduite d'un grand nombre d'observations :

$$e = 0{,}0347\, d + 0^{m}{,}325$$

$e$ est l'épaisseur à la clef, en mètres;
$d$ la distance des piédroits, si la voûte est en plein cintre; pour les voûtes surbaissées, $d$ exprime le double du rayon qui a servi à tracer la directrice de l'intrados de celles en arc de cercle, et l'arc supérieur de cette directrice dans celles en anse de panier.

Dans un travail publié récemment en France, M. *Léveillé,* ingé-

nieur en chef des ponts et chaussées, a prouvé que la formule de M. Perronet est applicable, quel que soit le tracé de la voûte; seulement, pour faciliter les calculs, il a adopté la relation :

$$e = \frac{1^m + 0{,}1\,d}{3}$$

Il a reconnu aussi que cette formule, dans laquelle $d$ désigne toujours l'ouverture, est applicable aux voûtes couvertes d'une grande surcharge de terre.

L'épaisseur des piédroits d'un aqueduc ne peut se déterminer théoriquement d'après les principes ordinaires de la poussée des voûtes, attendu qu'il est nécessaire de tenir compte de l'action des terres qui pressent latéralement les murs.

Cette action, due à la poussée latérale, est peu importante lorsque les piédroits ont une faible hauteur, ainsi que cela se présente dans les aqueducs ordinaires. Dès lors, si on détermine leur épaisseur par les formules de la théorie des voûtes, on obtient une valeur supérieure à celle qui convient, pour des terres de consistance moyenne. On peut donc prendre alors pour limites supérieures les résultats donnés par les formules suivantes de M. Léveillé :

$$E = \left(0^m{,}33 + 0{,}212\,d\right)\sqrt{\frac{h}{H} \times \frac{d}{f+e}} \text{ pour l'arc de cercle,}$$

$$E = \left(0^m{,}60 + 0{,}162\,d\right)\sqrt{\frac{h + 0{,}25\,d}{H} \times \frac{0{,}865\,d}{0{,}25\,d + e}} \text{ pour le plein cintre,}$$

$$E = \left(0^m{,}43 + 0{,}154\,d\right)\sqrt{\frac{h + 0{,}54\,b}{H} \times \frac{0{,}84\,d}{0{,}465\,b + e}} \text{ pour l'anse de panier,}$$

dans lesquelles il représente par :

E l'épaisseur des piédroits ;
$d$ l'ouverture de la voûte ;
$h$ la hauteur entre le dessus du radier et les naissances ;
$e$ l'épaisseur de la voûte à la clef;
$f$ la flèche ;
pour les voûtes en anse de panier, la formule a été établie dans l'hypothèse que l'intrados soit une ellipse ayant $d = 2a$ pour grand axe, et $b = f$ pour demi-petit axe;

H la distance verticale entre le dessus du radier et le niveau supérieur de la surcharge; si donc $h'$ est l'épaisseur de cette dernière, on a : $H = h + f + e + h' \times \frac{p}{p'}$, où $p$ et $p'$ représentent respectivement les densités de la terre et de la maçonnerie.

Le numérateur des fractions qui ont H pour dénominateur représente la hauteur du point où le joint de rupture rencontre l'intrados au-dessus du radier. Dans les voûtes en arc de cercle, le joint de rupture étant, en général, au-dessous des naissances, on l'a supposé aux naissances. Dans celles en plein cintre, extradossées horizontalement, le joint de rupture faisant un angle de 60° avec la verticale, on doit prendre $h + 0,25d$ pour le numérateur de H; en ce point, le rapport de la flèche à la corde est 0,288, valeur que ce rapport atteint rarement dans les voûtes en arc de cercle. Pour les voûtes en anse de panier, le joint de rupture, normal à l'intrados, fait avec la verticale un angle de 45°; et si l'on suppose que l'intrados est une ellipse, celle-ci est rencontrée par le joint de rupture à une hauteur $0,54b$ au-dessus des naissances; de sorte que le numérateur de H est $h + 0,54b$.

Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que les alternatives dans la pression des eaux contre les piédroits nécessitent un certain surcroît d'épaisseur, surtout lorsque la hauteur de ces derniers est assez grande.

De même que pour la clef des voûtes, l'épaisseur des piédroits n'a pas besoin d'être augmentée en proportion de la surcharge. Il peut arriver que le poids de celle-ci contribue plutôt à accroître la pression latérale que la poussée de la voûte. L'on remarque, en effet, que les culées des ponts et des passages enterrés tendent plus souvent à se déverser à l'intérieur que vers les terres, lorsqu'elles ont une forte hauteur et que le remblai supérieur est considérable.

Il peut donc arriver un moment où il soit nécessaire d'augmenter l'épaisseur des piédroits d'après leur hauteur au-dessus du radier, non plus pour résister à la poussée de la voûte, mais bien pour contrebalancer, par leur inertie, la pression latérale des terres. Ces cas se présentent rarement dans les aqueducs; nous y reviendrons dans la *Troisième partie*, en traitant la question des piles et culées.

Le tableau suivant ne contient que des voûtes en plein cintre : les autres présentent le désavantage de nécessiter des culées plus fortes. Il donne les épaisseurs des culées de divers ponts soumis à des pressions latérales et verticales plus ou moins considérables.

| DÉSIGNATION DES OUVRAGES. | Ouverture. | ÉPAISSEUR A LA CLEF | | Hauteur des culées. | ÉPAISSEUR DES CULÉES | | Surcharge sur l'extrados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | réelle. | calculée | | réelle. | calculée | |
| Pont du Rempart (Orléans à Tours). | 1m,20 | 0m,45 | 0m,37 | 1m,20 | 0m,55 | 0m,74 | 1m,70 |
| Pont de St-Hilarion (Paris à Chartres). | 2m,00 | 0m,40 | 0m,40 | 3m,80 | 1m,20 | 1m,09 | 4m,40 |
| Pont du Tertre (Paris à Chartres). | 3m,00 | 0m,45 | 0m,43 | 2m,50 | 1m,40 | 1m,30 | 6m,20 |
| Pont de la Tuilerie (Paris à Chartres). | 4m,00 | 0m,50 | 0m,47 | 3m,40 | 1m,40 | 1m,58 | 4m,10 |

Quand les aqueducs sont construits en galerie, ou bien, lorsque le massif à déblayer présente une cohésion très-forte, on détermine l'épaisseur des voûtes d'après les considérations émises au commencement de ce chapitre, et on se contente de donner aux piédroits 0m10 à 0m20 d'épaisseur en plus que la précédente.

Par suite des trépidations qui se produisent près des vannes, il est nécessaire d'augmenter de 0m20 à 0m30 l'épaisseur des piédroits, sur 1m25 à 1m50 de longueur, à l'emplacement de ces dernières.

Quant à l'épaisseur des murs en retour, elle se détermine d'après les considérations développées au chapitre VII.

Les vannes glissent dans des rainures pratiquées dans les piédroits, et s'appuient, lorsqu'elles sont baissées, sur un seuil de 0m15 à 0m20 encastré dans le radier.

Dans les aqueducs militaires, on ménage, en amont et en aval, des coulisses verticales de 0m20 environ de largeur et de profondeur, destinées à permettre la construction de barrages de sûreté, les vannes ayant généralement des tendances à s'infléchir sous de fortes pressions d'eau. Ces barrages servent aussi pour les réparations éventuelles.

Les chambres supérieures des vannes doivent s'élever jusqu'au niveau des hautes mers d'équinoxe. L'épaisseur des parois, dans les circonstances ordinaires de hauteur, varie de 0m40 à 0m50. Le tout est couronné d'une tablette, dans laquelle est fixé le cric de manœuvre.

La maçonnerie des aqueducs s'exécute en mortier très-hydraulique et en petits matériaux, sauf pour les seuils, tablettes et coulisses des vannes et des barrages, qui sont en pierre de taille.

Pour des aqueducs de section moyenne, le radier, construit aussi en petits matériaux, a une épaisseur de 0m30 à 0m40. Lorsque l'ouverture et la hauteur du pertuis atteignent plusieurs mètres, les radiers et avant-radiers, de même que les piédroits, rentrent dans la catégorie des radiers, avant-radiers et bajoyers des écluses. Les développements dans lesquels nous entrerons au sujet de ces derniers pourront, en grande partie, s'appliquer aux parties correspondantes des aqueducs.

Les vannes se construisent de plusieurs manières, suivant les dimensions du conduit et la hauteur d'eau à soutenir.

Quand la section ne dépasse pas 1m25 et 1m50 en largeur et en hauteur, elles se composent d'un redoublement de madriers en chêne, analogue à celui qui a été adopté pour les aqueducs des forts Sainte-Marie et Liefkenshoek, du bas Escaut. On les fait aussi en tôle plus ou moins épaisse, maintenue dans un encadrement en fer forgé. Ce système a été appliqué aux vannes des aqueducs des nouvelles fortifications d'Anvers. L'épaisseur de la tôle varie de 7 à 8 millimètres; le cadre a environ 0m02 d'épaisseur et 0m05 à 0m06 de largeur. La vanne glisse dans un châssis en fer à rainures, fixé dans les pierres de taille des piédroits et du radier.

Lorsque les dimensions sont plus fortes, on forme la vanne d'un double revêtement en madriers recroisés qui ont 0m05 d'épaisseur, fixé dans un bâti de 0m18 à 0m20 d'équarrissage.

D'après les expériences faites par *Mayniel,* le frottement d'une vanne en bois dans des coulisses en pierre de taille bouchardée est de $\frac{1}{8}$ de son poids. Afin de diminuer cette résistance, on la transforme en frottement de roulement au moyen de roulettes disposées sur le champ du bâti de la vanne.

Quelquefois, on préfère composer la vanne de deux parties distinctes, se manœuvrant chacune par un cric ou un treuil spécial; on

rend ainsi la manœuvre moins pénible, et on parvient souvent à réaliser d'autres conditions avantageuses. Nous en donnerons un exemple dans les applications militaires des écluses.

### Voûtes à l'épreuve.

Considéré au point de vue militaire, le problème de l'épaisseur des voûtes renferme un élément supplémentaire ; la nécessité de les rendre assez solides pour être *à l'épreuve*, c'est-à-dire, pour résister à l'action des bombes et autres projectiles. Cette nouvelle condition exige presque toujours une épaisseur plus forte que celle que l'on obtiendrait si l'on se contentait de satisfaire aux conditions ordinaires.

Pour fixer l'épaisseur des voûtes à l'épreuve, on s'est servi, jusqu'aujourd'hui, de la formule :

$$e = 0{,}342\sqrt{D}$$

basée sur les dimensions du magasin à poudre-type de Vauban, et dans laquelle $e$ représente l'épaisseur aux reins, D étant le diamètre de l'intrados.

Cette formule, qui ne s'appuie sur aucun fait d'expérience bien déterminé, n'est plus applicable désormais. Le problème à résoudre se présente dans des conditions tout à fait autres, par suite de l'emploi des nouveaux projectiles allongés et des expériences concluantes, sur l'action du choc et de l'explosion, exécutées dans divers pays, et notamment en Belgique (1851-1855).

Il résulte de ces expériences, que l'on peut désormais s'appuyer sur les principes suivants :

1° une bombe de $0^{m}29$, lancée sous un angle de 60°, traverse au minimum $0^{m}60$ de terre, et s'arrête ensuite sur la première couche de saucissons qu'elle rencontre ; l'effet du choc se transmet néanmoins plus bas.

2° l'explosion d'une bombe de 29, placée sur une surcharge de terre de $0^{m}60$, produit, sur le blindage, des effets plus violents que ceux du choc simple de l'expérience précédente.

Ce résultat, parfaitement démontré en 1851 et 1852 au polygone

de Brasschaet, est en opposition complète avec les conclusions émises par le Comité de Douai, à la suite des expériences exécutées de 1826 à 1829.

3° L'action simultanée du choc et de l'explosion est supérieure à la somme de ces actions divisées, c'est-à-dire, au résultat global obtenu en faisant éclater une bombe identique, au point de l'épaisseur de la surcharge où elle se serait arrêtée si elle avait été lancée par le mortier.

4° Il ne suffit pas de faire cette dernière expérience pour en conclure l'action simultanée, et, par suite, la résistance absolue de la voûte ou du blindage.

Quant à la pénétration des projectiles allongés dans la terre et dans la maçonnerie, on possède un grand nombre d'expériences très-variées, suivant la charge employée, la distance, la résistance de l'obstacle, la forme et le calibre du projectile, ainsi que le système de bouche à feu adopté. Mais ces résultats s'appliquent aux effets du tir direct ou légèrement courbe; ils ne permettent de poser aucune conclusion quant aux actions du choc vertical, le plus à craindre pour les voûtes.

L'influence des canons rayés ne doit guère entrer en ligne de compte dans la détermination de l'épaisseur des voûtes à l'épreuve, soit des magasins, soit des abris ou logements. Mais son action n'est pas nulle sur la résistance des voûtes destinées à abriter les manœuvres des constructions hydrauliques. Celles-ci sont, en effet, généralement peu élevées au-dessus du terrain naturel, et, par conséquent, sont exposées plus ou moins à l'action des nouveaux projectiles lancés sous un certain angle d'élévation.

D'un autre côté, par suite de l'incertitude du tir des mortiers, il est probable que des études et des expériences seront faites dans le but de rayer ces bouches à feu, et d'augmenter le poids de leurs projectiles, en donnant à ceux-ci une forme allongée. Si, à cette modification, on ajoute une fusée explosive à combustion assez lente pour permettre le maximum de pénétration, les effets destructeurs des bombes et obus ainsi transformés seront augmentés dans une proportion considérable.

La nécessité de modifier la formule de Vauban est donc évidente.

Quoique aucune expérience décisive ne puisse servir de guide en cette circonstance, il nous semble possible, en attendant la sanction de l'avenir, de partir d'une certaine base, qui procure à la fois une résistance bien supérieure à celle des voûtes de Vauban, sans tomber dans des exagérations de dépense et de difficultés d'établissement. Cette condition nous paraît d'autant plus facile à réaliser que, dans les ouvrages militaires, les pertuis ou les chambres à couvrir n'ont généralement qu'une faible ouverture, dont les limites peuvent être fixées entre $2^m50$ et $4^m00$.

D'après ces considérations, si nous fixons à $0^m80$ l'épaisseur d'une voûte en plein cintre de $2^m50$ de diamètre, et à $1^m00$ celle d'une voûte de 4 mètres, la formule deviendra :

$$e = 0{,}50 \sqrt{D} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (A)$$

La formule de Vauban donnerait dans ces deux cas :

$$e = 0{,}342 \sqrt{2{,}50} = 0{,}55$$
$$e = 0{,}342 \sqrt{4} = 0{,}70 \text{ environ}$$

Nous proposons donc d'adopter provisoirement la formule (A), considérée comme donnant des épaisseurs limites inférieures, la surcharge de terre étant, au minimum, de 1 mètre, et la chape ayant $0^m15$ à $0^m20$ d'épaisseur aux reins.

## APPLICATIONS MILITAIRES.

### Aqueducs des forts Sainte-Marie et Liefkenshoek.

*Description générale.* — Les aqueducs des forts Sainte-Marie et Liefkenshoek ne diffèrent entre eux que par leurs fondations et leur longueur. Tous deux ont pour but d'établir une communication entre l'Escaut et les fossés des ouvrages.

L'aqueduc du fort Liefkenshoek ayant été établi dans la digue même du fleuve, sa construction a nécessité un déblai préalable dans cette digue, qui forme massif de contrescarpe, et la construction d'une contre-digue provisoire du côté du fleuve.

Les fondations reposent sur un grillage, sans pilotis.

L'établissement de l'aqueduc de Sainte-Marie n'a exigé aucun travail préalable, la nouvelle digue de contrescarpe se trouvant à l'intérieur de la digue de mer, et sa construction ayant été protégée par cette dernière. L'éclusette de ce pertuis remplace avantageusement le siphon dont nous parlerons plus loin.

Les fondations du massif sont établies sur un pilotis relié par un grillage.

La fig. 52 donne les détails de l'aqueduc de Sainte-Marie; les cotes y ont été relevées de 0m75.

Dans la description suivante, nous exposerons, quant aux fondations, ce qui est relatif au grillage de l'aqueduc de Liefkenshoek; le reste est applicable aux deux ouvrages.

Le canal voûté a 0m80 de largeur et 1m10 de hauteur sous clef. Il est construit sur un massif de fondation ayant 2m20 de largeur et 0m40 de hauteur.

Les piédroits, sur 0m40 de hauteur, ont 0m60 d'épaisseur; et, supérieurement, 0m50 seulement.

La voûte est en plein cintre et a 0m40 d'épaisseur; elle est surmontée d'une chape, dont la crête s'élève de 0m15 au-dessus de l'extrados, et dont les pans s'abaissent de manière à rencontrer, à 0m50 plus bas, le parement extérieur des piédroits exhaussés. Vers le milieu de la longueur du canal voûté, on a établi des coulisses pour une vanne; à cet effet, il a été construit sur les piédroits et la voûte du canal quatre petits murs formant une cage ou chambre, de 0m80 de longueur sur 0m60 de largeur, qui s'élève jusqu'à la cote 5m00.

Le radier du musoir a 2m00 de longueur, 0m80 de largeur contre le canal, et 2m00 à son autre extrémité. Le mur de front a 0m80 d'épaisseur, et les ailes 1m00; les murs en retour ont 1m50 de longueur sur 1m00 également d'épaisseur.

Tout le musoir est établi sur un massif général en maçonnerie, faisant 0m10 de saillie sur tous les parements extérieurs; il a 0m59 de hauteur pour la partie correspondant au mur du front, et 0m49 devant le radier et les murs en retour.

Dans l'angle formé par le mur de front et les joues du musoir, on a ménagé des coulisses de barrage de 0m20 de côté.

Le mur de tête, vers le fossé, a 4m80 de longueur et 1m00 d'épaisseur.

Il est élevé sur un massif de 0m59 de hauteur, faisant 0m10 de saillie sur tous les parements.

Toute la construction repose sur un grillage général, en charpente.

Les intervalles, jusqu'à l'arasement de la surface supérieure du grillage, sont remplis par une maçonnerie en moellons.

En avant du musoir, il a été établi un encaissement, qui se prolonge jusqu'à l'alignement des parements postérieurs de la fondation des murs en retour; il a 0m80 de largeur, et s'élève jusqu'à la retraite des maçonneries qu'il entoure.

Sous le mur de tête, vers l'Escaut, on a construit un encaissement semblable au précédent; il a 1m00 de largeur, 5m00 de longueur, et s'élève jusqu'à la surface inférieure du grillage.

Le premier encaissement est entouré d'une rangée de palplanches, maintenues par neuf pilots.

Devant le musoir, on a établi un faux radier en fascinage, recouvert par des moellons. Il a 1m00 d'épaisseur, tout compris, 6m85 de longueur, 4m00 de largeur contre les murs en retour, et 6m00 à l'autre extrémité.

De chaque côté de ce faux radier, il a été construit un *pakwerk*, ayant 8m00 de longueur, et 2m50 de largeur; les talus tournés vers l'axe du canal, forment une surface gauche, ayant 0m30 d'inclinaison contre les maçonneries, et 2m00 à la partie extrême.

Devant l'issue vers le fossé, on a construit un faux radier semblable à celui d'amont. Il a 10m00 de longueur, et 5m00 de largeur sur les deux premiers mètres; sa largeur, sur la partie restante, est de 8m00. Parallèlement à la direction du canal, on a établi de chaque côté du mur de tête, un *pakwerk* ayant 2m50 de largeur, 3m00 de longueur, et 1m70 de hauteur, se terminant ensuite par un talus dont le sommet se trouve sous la tablette du couronnement, et dont la base est égale à celle du *pakwerk*.

*Description détaillée.* — Sur toute la surface du déblai, ainsi que sur les parties qui devaient recevoir la contre-digue, les gazons ont été enlevés sur une épaisseur de 0m15, et conservés pour être employés comme il sera dit ci-après.

Les remblais de la contre-digue ont été exécutés au moyen des déblais provenant de la digue de contrescarpe, et, par couches réglées de $0^m25$ à $0^m30$, fortement damées.

Le talus extérieur a été dressé au fur et à mesure que s'élevait le déblai, et immédiatement revêtu en gazons de schorres provenant de la surface des déblais.

Ce travail devait être terminé en huit jours au plus; il a été fait pendant une quadrature de lune.

Le grillage, établi sur le fond du déblai parfaitement nivelé, se compose de $264^m00$ courants de bois de hêtre, en pièces ayant $0^m20$ sur $0^m25$ d'équarrissage, et de $44^m80$ courants de même bois, mais de $0^m20$ sur $0^m30$ d'équarrissage. Ces longueurs ne comprennent pas les assemblages à trait droit, qui réunissent toutes les parties d'un même cours.

Les assemblages ont $0^m15$ de longueur et correspondent aux points de croisement des traversines et longrines, sans qu'il y ait toutefois plus d'un assemblage sur la même traversine. Toutes les longueurs inférieures à $6^m00$ sont d'une pièce.

Les longrines et traversines sont encastrées par des entailles de $0^m03$ de profondeur, faites dans les deux pièces.

Le système est consolidé : 1° par 90 boulons barbelés en fer forgé, de $0^m40$ de longueur, et de $0^m02$ d'équarrissage à une des extrémités; 2° par 48 boulons semblables, mais de $0^m45$ de longueur.

Les pilots qui maintiennent les palplanches ont été battus au moyen d'un mouton de 300 kil., jusqu'à ce que leur tête parvînt dans le plan passant $1^m00$ au-dessus du repère, et ensuite recépés à la cote voulue. On y a taillé alors un tenon de $0^m25$ de hauteur et de $0^m06$ d'épaisseur.

Tout le développement des files de ces pilots est recouvert d'un chapeau, dans lequel sont taillées les mortaises nécessaires à la pénétration des tenons. Ce chapeau, en bois de hêtre, a $0^m25$ d'équarrissage et se compose de trois pièces, dont la première, parallèle au mur de front, a $7^m50$ de longueur, et chacune des deux autres en retour, $4^m50$. Les mortaises ont, à la partie inférieure, les dimensions horizontales des tenons des pilots, tandis qu'à la partie supérieure la longueur va en s'évasant de $0^m05$ de chaque côté, afin de permettre

l'introduction de coins en bois de chêne qui y ont été chassés avec force.

L'assemblage est renforcé, sur chaque pilot, par une barre de fer méplat, ayant $1^m35$ de développement, $0^m05$ de largeur et $0^m01$ d'épaisseur. Cette barre enveloppe le chapeau, et est fixée aux pilots, à chacune des extrémités, par trois clous de $0^m15$ de longueur.

Les palplanches sont en bois de sapin ; elles ont $0^m25$ à $0^m30$ de largeur, $0^m10$ d'épaisseur et $2^m80$ de longueur, sont affûtées obliquement sur une longueur de $0^m20$ à leur extrémité inférieure, et assemblées entre elles à rainures et grains d'orge de $0^m05$ de profondeur.

Elles ont été disposées en châssis, pour le battage, au moyen de moises horizontales, fixées aux palplanches extrêmes et réunissant toutes les pièces placées sur le même alignement. Elles ont été battues à petits coups, avec un mouton pesant 90 kil., puis recépées à la cote des pilots, et fixées ensuite aux chapeaux, chacune par trois clous de $0^m25$ de longueur.

Après le battage des pilots et palplanches, on a procédé au déblai sur l'emplacement de l'encaissement. On a commencé par le milieu, sur une longueur de $3^m00$ environ ; cette partie étant approfondie jusqu'à la cote fixée, on l'a immédiatement remplie avec du béton jusqu'à la surface supérieure du grillage. On a établi ensuite les deux parties contiguës jusqu'aux palplanches latérales, et le travail a été continué de la même manière jusqu'à l'achèvement complet de l'encaissement au niveau de la première partie décrite.

L'encaissement sur le mur de front a été conduit de la même manière.

Sur le béton, en avant du musoir, on a construit une maçonnerie en briques, reliée avec le massif des fondations sur lequel repose le musoir. Elle est élevée partout au niveau de la retraite du massif, et affleure la face extérieure des chapeaux, sauf dans la partie correspondant au radier du musoir, où a été réservée la place nécessaire pour une bordure en pierre de taille.

Toutes les maçonneries sont en briques, sauf le radier du musoir, les parements du mur de front et des joues du musoir, ainsi que quelques autres parties, qui sont en pierre de taille.

Le radier du canal voûté est composé d'un pavement en briques de champ.

A la hauteur du chapeau de l'encaissement, on a relié les maçonneries du musoir à cette pièce par sept tirants de 1m50 de longueur, fixés aux bois par deux boulons barbelés, et à la maçonnerie par des clefs de 0m80 de longueur.

Les maçonneries des joues du musoir sont reliées à celles du canal par quatre tirants, dont deux de 1m00 de longueur avec quatre clefs de 0m60, et deux de 2m00 avec quatre clefs de 1m20.

Toutes ces pièces ont 0m03 d'équarrissage.

Le mur de tête du fossé est maintenu également par deux tirants en tout semblables aux derniers décrits.

La maçonnerie de remplissage en moellons, toute la maçonnerie du musoir, jusqu'au plan vertical du pavement postérieur du mur de front, et la maçonnerie de fondation de la tête vers le fossé, sont faites en mortier hydraulique n° 1 ; toutes les autres sont en mortier hydraulique n° 2.

Les parements cachés sont recouverts d'un enduit en mortier hydraulique n° 1, de 0m005 à 0m007 d'épaisseur.

A l'endroit des coulisses, l'aqueduc est fermé par une vanne, de 1m50 de hauteur sur 0m70 de largeur. Elle est formée de deux revêtements, en bois de chêne, de 0m05 d'épaisseur, se recroisant à angle droit. Quatre madriers sont placés dans la largeur de la vanne, et cinq dans la hauteur. Ils sont assemblés à rainures et languettes et fixés les uns aux autres, à chaque recroisement, par cinq clous rivés, de 0m10 de longueur. Avant de les clouer, on a enduit de goudron les surfaces à mettre en contact, et l'on a interposé entre elles une légère couche d'étoupes ; tous les joints ont été ensuite calfatés et brayés, et l'on a goudronné en deux couches les surfaces extérieures.

Il a été placé entre les madriers :

1° une double branche en fer, de 0m015 sur 0m08 d'équarrissage, ayant une longueur de 0m75 dans chaque partie séparée, et de 0m25 dans la partie commune. Cette dernière se termine par un œillet, de 0m03 de diamètre intérieur, au moyen duquel la vanne est attachée à la tige du cric ;

2° deux crochets en fer forgé, de $0^m65$ de longueur sur $0^m05$ et $0^m02$ d'équarrissage.

Ces ferrures sont fixées par des boulons rivés, de $0^m01$ de diamètre, espacés de $0^m08$ à $0^m10$ les uns des autres.

Dans l'établissement des faux radiers, on a déblayé le terrain, jusqu'à la profondeur nécessaire pour que l'ouvrage pût avoir $1^m00$ d'épaisseur, et parvenir par sa face supérieure aux cotes fixées. On a placé alors, sur le terrain naturel, une couche de roseaux, ayant $0^m15$ d'épaisseur les roseaux et posés dans le sens du courant; au-dessous sont recroisés deux lits de fascines dégarnies de harts, ayant chacun $0^m22$ de hauteur.

Le tout est maintenu par des tunages de $0^m20$ de hauteur, placés transversalement au courant, à $0^m40$ les uns des autres; les intervalles des tunages ont ensuite été arasés par des décombres, et toute la surface, sauf les parties sur lesquelles reposent les *pakwerk*, a été recouverte de gros moellons de Tournai ou de Vilvorde, sur $0^m20$ de hauteur. Ces moellons sont bien serrés, battus et garnis dans leurs joints par des recoupes.

Les *pakwerk* construits devant les musoirs et le mur de tête vers le fossé, sont établis sur une bonne couche de terre glaise, parfaitement damée et dressée. Les terres supérieures sont arasées avec des gazons de schorres.

Au fur et à mesure que les maçonneries s'élevaient, on a remblayé immédiatement contre elles, en ayant soin de choisir les meilleures terres glaises provenant des déblais, pour les mettre en contact avec les maçonneries. Ces remblais ont été conduits par couches uniformes de $0^m20$ à $0^m30$ fortement pilonnées.

On a rétabli aussi la digue sur son profil primitif. Toute la surface du remblai a été recouverte en gazons, et le talus extérieur de la digue a été garni d'un paillassonnage de $0^m03$ à $0^m05$ d'épaisseur, fait en roseaux en feuilles, arrêtés par des liens de paille placés à $0^m12$ de distance.

## AQUEDUCS-SIPHONS.

### En maçonnerie.

Lorsqu'un cours d'eau rencontre une masse liquide quelconque qu'il doit franchir sans s'y déverser, et lorsque les eaux se trouvent de part et d'autre à peu près au même niveau, on conduit celles du premier sous le lit de la masse à traverser au moyen d'un canal souterrain appelé *aqueduc en siphon*.

Si le cours d'eau à diriger est peu important, on se contente d'employer un tuyau en fonte. Dans les cas ordinaires, l'aqueduc se construit en maçonnerie, et sa section affecte une forme variable. Dans l'un et l'autre cas, la dénomination donnée à ce genre de conduit est fort impropre, le phénomène qui se produit est celui des vases communiquants et nullement celui des siphons. Ce dernier n'aurait réellement lieu que dans le cas où l'on voudrait prolonger un cours d'eau au delà d'un obstacle fixe, tel qu'une digue, sans percer d'outre en outre cet obstacle par un aqueduc ordinaire.

Il ne se présente guère de circonstances, dans les constructions maritimes, où il soit nécessaire d'avoir recours à un ouvrage de cette espèce. Aussi cette question sera-t-elle traitée d'une manière plus complète dans la *Troisième partie*. Nous nous bornerons ici à donner une application militaire très-intéressante, qui est relative à l'établissement d'un véritable siphon, destiné à introduire les eaux des marées dans les fossés d'un ouvrage de fortification.

### En fonte.

Ainsi que nous l'avons vu dans la *Première partie* (Hydraulique), la *charge* ou la *charge entière* d'une conduite est la différence de niveau entre la surface AB (fig. 49) du réservoir et l'orifice $a'b'$ de sortie; c'est H.

S'il n'y avait aucune perte de vitesse pendant le trajet depuis le réservoir jusqu'à la sortie, la vitesse en $a'b'$ serait due à la charge H sur le centre O', et l'on aurait :

$$U = \sqrt{2gH}$$

Mais il se produit deux pertes : 1° celle qui est engendrée par la

viscosité agissant sur une longueur de tuyau $OO' = L$; 2° celle qui est due à l'étranglement à l'entrée *ab*.

La première, comme nous l'avons vu, peut être représentée par l'expression $aU + bU^2$ sur l'unité de surface, et par $L \frac{\chi}{\Omega} (aU + bU^2)$ sur toute l'étendue du tuyau. Si elle agissait seule, elle ferait équilibre à la force perdue depuis O jusqu'en O'. Si donc U est la vitesse moyenne restante en O', cette vitesse U ne correspondra plus à H, mais à une charge $H' < H$, et la force perdue de O en O' sera $H - H' = H - \frac{U^2}{2g}$. Cette force perdue étant due à la viscosité, l'on aurait donc :

$$H - \frac{U^2}{2g} = \frac{\chi}{\Omega} L (a U + b U^2)$$

Mais, si l'on appelle toujours U la vitesse en O', et si l'on tient compte de la perte due à l'étranglement au delà de O, alors la perte de force qui a réellement eu lieu est bien toujours $H - \frac{U^2}{2g}$, mais elle fait équilibre à la viscosité *augmentée* de la force perdue par le fait de l'étranglement, qui est égale à 1/3 de la charge primitive ou à la moitié de la charge restante. Cela étant, puisqu'il reste dans le tuyau une charge $\frac{U^2}{2g}$ après la perte faite, il en résulte qu'il y avait, avant la perte, une charge $\frac{U^2}{2g} + \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{2g}$ ou bien $\frac{3}{2} \cdot \frac{U^2}{2g}$. Donc, s'il n'y avait pas eu de perte par l'étranglement, l'on aurait eu, en O', une force $\frac{3}{2} \cdot \frac{U^2}{2g}$ ; la perte due à la viscosité eût donc été $H - \frac{3}{2} \cdot \frac{U^2}{2g}$. Par conséquent il faut poser :

$$H - \frac{3}{2} \cdot \frac{U^2}{2g} = \frac{\chi}{\Omega} L \left(a U + b U^2\right)$$

qui est l'équation trouvée à la page 90 de la *Première partie*.

Lorsque le tuyau forme des coudes, il faut, en outre, tenir compte des pertes de vitesse que ceux-ci produisent.

Suivant *Dubuat*, la résistance R engendrée par un coude peut s'exprimer comme suit :

$$R = 0{,}0123\, U^2 \times \sin.^2 \alpha$$

expression dans laquelle $\alpha$ est l'angle sous-tendu ou l'angle de réflexion. La perte de charge $p$ correspondante serait donc :

$$p = \frac{U^2}{2g} \times 0{,}0123 \sin.^2 \alpha$$

En discutant les résultats obtenus par Dubuat, *Navier* a posé la formule :

$$p = \frac{U^2}{2g}\left(0{,}0039 + 0{,}018\, R\right)\frac{c}{R}$$

dans laquelle R représente le rayon de courbure du coude, et $c$ le développement de l'arc supérieur formé par ce dernier.

Ces deux formules donnent les mêmes résultats dans l'application.

Si l'on appelle $n$ le nombre de coudes censés égaux, l'équation générale qui détermine la vitesse U du régime sera :

$$H - \frac{3}{2}\frac{U^2}{2g} - n\frac{U^2}{2g} \times 0{,}0123 \sin^2 \alpha = \frac{\chi}{\Omega} L \left(a U + b U^2\right)$$

$$U^2\left(\frac{3}{2} + 0{,}0123\, n \sin^2 \alpha\right) = 2gH - \frac{2\chi}{\Omega} L \left(a U + b U^2\right) g$$

Ou bien, en remplaçant $aU + bU^2$ par la valeur donnée par M. *Darcy* pour les tuyaux neufs en fonte, et faisant approximativement $g = 10$, l'on obtient :

$$U^2\left(\frac{3}{2} + 0{,}0123\, n \sin^2\alpha\right) = 2gH$$

$$- \frac{2\chi L}{\Omega}\left[\frac{\left(0{,}00032 + \frac{0{,}000{,}000{,}0376}{r^2}\right) U + \left(0{,}00443 + \frac{0{,}000{,}062}{r}\right) U^2}{2}\right]$$

L'épaisseur à donner aux tuyaux cylindriques dépend de la pression intérieure maxima qu'ils ont à supporter. Comme les charges déterminent les vitesses et que les pressions dépendent de ces dernières, la charge maxima d'un siphon sera toujours moindre que H,

c'est-à-dire que la charge *entière* ou la hauteur du niveau du réservoir au-dessus de l'orifice de sortie.

Si l'on représente par :

$e$ l'épaisseur du tuyau en millimètres ;

H la pression intérieure exprimée en mètres de hauteur d'eau ;

D le diamètre du tuyau en mètres ;

R la résistance à la traction de la matière dont est composé le tuyau, en kilogrammes, par millimètre carré de section ;

la formule qui donne l'épaisseur est la suivante :

$$e = \frac{HD}{2R}$$

Pour la fonte, la résistance absolue à la traction varie de 12 à 14 kil. par millimètre carré ; dans la pratique, on réduit à 3 et même à 2 kil. la limite des charges permanentes. Pour cette espèce de tuyau, la formule devient donc :

$$e = \frac{HD}{4} = 0{,}25\ HD$$

Ou bien, en exprimant $e$ en mètres :

$$e = 0{,}00025\ HD$$

Cette formule donne des épaisseurs plus faibles que celles qui sont adoptées en pratique, par suite de la difficulté d'obtenir sans défauts des tuyaux en fonte de $1^m50$ à $2^m50$ de longueur, par la méthode de coulage suivie généralement.

On ne donne jamais moins d'un centimètre d'épaisseur aux tuyaux en fonte, tant à cause de la difficulté de les couler sous de moindres dimensions, que pour les pertes de résistance provenant des soufflures ou de la rouille. C'est donc là un terme constant, et la formule peut alors se mettre sous la forme :

$$e = 0^m{,}01 + f(D, H)$$

Dans les arts, l'épaisseur des tuyaux en fonte coulés horizontalement se détermine par la relation :

$$e = 0^m{,}01 + 0{,}02\ D$$

en ayant soin de les soumettre au préalable à une pression d'épreuve de 10 atmosphères.

Depuis quelques années on coule les tuyaux debout, ce qui contribue à diminuer les chances de soufflures en augmentant la densité par la pression supérieure. Par cette méthode on peut, sans inconvénient, diminuer les épaisseurs, et adopter la formule ;

$$e = 0^{m},008 + 0,016\ D$$

La fig. 50 représente la coupe de deux tuyaux ainsi coulés, de $0^{m}50$ de diamètre, l'un à emboîtement et l'autre à bride. Les cotes expriment des millimètres.

Quant aux tuyaux en plomb, on les fabrique de diverses manières. On en a coulé jusqu'au diamètre de $0^{m}216$, et de 4 mètres de longueur. Ceux que l'on a étirés n'ont jamais dépassé le diamètre de $0^{m}108$ Depuis 1840, on comprime le plomb sous un piston de presse hydraulique, et on l'oblige à passer par un orifice annulaire d'où il sort en tuyaux ; on atteint ainsi jusqu'au diamètre de $0^{m}10$. Au-dessus de cette limite, les tuyaux se font avec des plaques de plomb que l'on soude après les avoir roulées.

Pour calculer l'épaisseur d'un tuyau en plomb, on peut se servir de la formule :

$$e = \frac{HD}{2R}$$

D'après des expériences de Navier, la ténacité absolue du plomb est de $1^{k},35$ par millimètre carré, et la charge sous laquelle il commence à s'étendre varie entre la moitié et les deux tiers de la résistance absolue. Une expérience faite par M. *Jardiné* a donné $1^{k},37$ pour résistance absolue, et $1^{k},14$ pour la charge sous laquelle commence la dilatation.

Si l'on adopte $1^{k},30$, c'est-à-dire une résistance 10 fois moindre que celle de la fonte, il semble naturel de donner aux tuyaux en plomb une épaisseur 10 fois plus forte que celle des tuyaux en fonte placés dans les mêmes circonstances. Mais comme il est possible d'obtenir des tuyaux en plomb très-homogènes, même sous une faible épaisseur, on peut prendre pour charge permanente le quart de la résis-

tance absolue, c'est-à-dire remplacer R par $0^k325$ dans la formule précédente ; donc :

$$e = \frac{HD}{0,65}$$

C'est à peu près la résistance adoptée pour les tuyaux en fonte coulés debout.

D'après Bélidor, un tuyau en plomb de $0^m33$ de diamètre et de $0^m02$ d'épaisseur peut résister à une pression de 3 atmosphères ; ce résultat s'est vérifié par l'expérience.

Ainsi qu'il résulte des considérations qui précèdent, les tuyaux en fonte sont infiniment moins coûteux que ceux en plomb de même résistance.

On fait encore des tuyaux en bois. Leur résistance à la traction est très-grande, mais ils sont promptement hors d'usage. Les bois employés sont : le chêne, l'aulne et l'orme.

D'ordinaire, la garniture des joints des tuyaux en fonte se fait en corde et en plomb, afin de la rendre élastique. Après avoir matté la corde dans le fond du joint, on remplit le reste de plomb fondu, que l'on matte fortement à son tour.

Comme l'opération précédente exige des ouvriers exercés, on peut aussi faire la garniture en plaçant extérieurement dans le joint un carton goudronné, et en remplissant l'intérieur avec un mastic composé d'un mélange de 98 parties de limaille de fonte tamisée et non oxydée et de 1 partie de fleur de soufre, sur lequel on verse une dissolution de 1 partie d'hydrochlorate d'ammoniaque dans l'eau bouillante. On amène le mélange à la consistance d'un mortier ordinaire en le brassant fortement, et on en remplit les joints en le bourrant avec force.

Si l'on représente par :

Z la hauteur de la colonne d'eau qui mesure la pression atmosphérique, soit $10^m32$ ;

$z$ la distance du sommet du siphon au réservoir d'alimentation ;

a plus grande hauteur qu'on peut faire franchir aux branches d'un siphon, sans interrompre la régularité d'un mouvement continu, sera limitée par cette condition : que la différence $Z - z$ ne doit pas être

inférieure à la perte de chute provenant du travail absorbé par les forces passives dues aux étranglements, aux coudes, à la viscosité et aux bouillonnements ou remous; sinon, la vitesse de la branche descendante sera souvent supérieure à celle de la branche ascendante, le vide barométrique se formera au sommet, et l'écoulement sera intermittent et irrégulier.

## APPLICATION MILITAIRE.

### Siphon du fort Sainte-Marie.

*Description raisonnée.* — Le fort Sainte-Marie, tel qu'il existait jusqu'en 1860, n'était séparé de l'Escaut que par la digue de mer qui limitait son fossé capital. En vue de la salubrité et de la défense, il fut décidé en 1848 qu'une communication serait établie à travers la digue entre le fleuve et le fossé, afin de pouvoir renouveler à volonté les eaux dormantes de ce dernier, et augmenter leur hauteur.

Sous le point de vue militaire, un aqueduc avec éclusette, comme celui qui existe actuellement, eût présenté de grands avantages et eût été adopté si des considérations locales ne se fussent opposées à son exécution. La construction d'un tel ouvrage exigeait le déplacement provisoire de la digue de mer, dont le massif, étroitement resserré entre l'Escaut et le fossé, n'a à la base que la largeur strictement nécessaire à son assiette ; ce travail présentait donc de grandes chances d'accidents, surtout dans le cas où une marée extraordinaire, ou bien une tempête, serait venue assaillir l'ouvrage en construction. Ces considérations ont déterminé M. le capitaine du génie *F. Ablay* à remplacer l'éclusette par un siphon en fonte, présentant, il est vrai, moins d'avantages militaires, mais n'offrant aucun danger dans l'établissement, tout en procurant une économie notable.

Les détails qui suivent sont extraits d'une notice insérée par M. Ablay dans les *Annales des Travaux publics de Belgique.*

Le siphon (fig. 51) se composait d'un tube cylindrique en fonte, de $0^m20$ de diamètre intérieur et de $0^m015$ d'épaisseur de métal. Il était divisé en trois parties principales : une branche ascendante à partir de l'Escaut, une branche descendante du côté du fossé, et une

partie intermédiaire au sommet. Cette dernière, qui a été placée au-dessus du niveau des marées hautes ordinaires pour prévenir les filtrations dangereuses dans les terres le long du tube, était elle-même composée de deux parties : l'une parfaitement horizontale, correspondait au mécanisme de l'appareil, l'autre était faiblement inclinée vers le bas, afin que l'air, qui parviendrait à s'introduire dans le tube, fût forcé de remonter jusqu'au sommet, et d'entrer dans un récipient disposé en dehors du courant.

Les exigences militaires ont imposé l'obligation d'enterrer le corps du siphon et de défiler son mécanisme des feux de l'Escaut, c'est-à-dire de dérober toutes les parties de l'appareil à la vue des bâtiments naviguant dans le fleuve. Cette obligation, à laquelle il sera bon de se soustraire chaque fois que les circonstances le permettront, n'est utile à constater qu'au point de vue des soins qu'il faut apporter, dans ce cas, à la fermeture hermétique de toutes les articulations du tube, afin de prévenir les prises d'air, qui deviennent fort difficiles à découvrir après le recomblement de l'excavation.

Le tube, qui portait sur le terrain par des semelles en bois d'un mètre de longueur, et sur lesquelles il était assujetti à droite et à gauche par des tasseaux, se composait de tuyaux se réunissant par des manchons dans les parties droites, et par des collets boulonnés dans les coudes et les joints obliques ; tous ces assemblages étaient fermés hermétiquement par des étoupes graissées, du mastic de limaille de fer et des rondelles en plomb, et pour plus de précaution, on les avait enveloppés dans de gros bourrelets d'argile.

Aux extrémités du siphon, on avait placé deux cuvettes en tôle, solidement chaudronnées, et fortement assujetties à demeure par des pilots, des traverses et des moises. Elles devaient résister aux mouvements d'ébranlement et de trépidation de la colonne d'eau en circulation dans le siphon, pour ne pas occasionner la rupture des joints du tube.

Les cuvettes sont destinées à immerger constamment les deux orifices inférieurs du siphon, et à prévenir ainsi l'introduction de l'air par les extrémités du tube pendant les basses eaux. Celle qui est placée dans le fossé doit en outre empêcher les effets du bouillonnement du courant au sortir du siphon; ce qui pourrait avoir également

l'introduction de l'air pour résultat. Elles sont couvertes par des grilles pour arrêter les corps flottants entraînés par le courant; la cuvette de l'Escaut, qui se comblait rapidement par des dépôts d'alluvions, a été garnie d'un couvercle mobile en tôle; enfin, celle du fossé avait un clapet fermant le débouché du tube; ce clapet était muni d'une charnière horizontale et d'un talon qui l'empêchait de se relever au delà de la verticale; il ne pouvait ainsi se renverser, et devait forcément retomber sur l'ouverture du tube, quand il n'était plus soutenu par le courant.

Le mécanisme du siphon était concentré dans une loge en maçonnerie, dont la dalle de recouvrement venait araser la crête de la digue; il se composait d'un grand robinet, d'un récipient à air et à eau, et d'une pompe aspirante.

Le grand robinet avait une section ouverte égale à celle du siphon, et servait à rétablir ou à intercepter à volonté la circulation du courant dans le tube. Il était muni d'un engrenage, qui avait la double destination de faciliter la rotation du tampon et de ne lui permettre qu'un mouvement lent, favorable à la conservation des assemblages du siphon; s'il n'y avait pas d'engrenage sur le robinet, il pourrait se faire que, par la maladresse ou la négligence du préposé à la manœuvre, le courant fût brusquement arrêté au moment de la plus haute marée, et, par conséquent, de la plus grande vitesse de circulation; la colonne liquide contenue dans le tube, formant une masse assez considérable, produirait alors un effet analogue à celui du bélier hydraulique, et aurait pour conséquence la rupture des soudures des tuyaux. La lenteur du mouvement de l'engrenage rend ces accidents impossibles.

La construction des grands robinets, comme celui du siphon de Sainte-Marie, dont le noyau avait $0^{m}38$ au plus fort diamètre, présente des difficultés matérielles d'exécution qui occasionnent d'ordinaire des fuites ou des suçoirs par la surface conique du joint, suivant que la pression est intérieure ou extérieure au tube sur lequel le robinet est adapté. Cela provient de ce que les deux grandes surfaces coniques de frottement concave et convexe du noyau et du creux ne peuvent être alésées et tournées suivant des formes rigoureusement mathématiques et semblables, et que le contact n'est jamais parfaitement intime sur toute leur étendue.

Pour remédier à ces défauts d'exécution presque inévitables et qui n'eussent pas permis au siphon de fonctionner avec continuité, on a fermé hermétiquement les deux extrémités du joint conique par l'appareil de compression indiqué à la figure 54. Le tampon et le renfort du tuyau, à l'emplacement du robinet, ont été recoupés et ajustés, haut et bas, dans deux plans perpendiculaires à l'axe de rotation du tampon ; sur les deux surfaces planes ainsi formées, et devant l'intersection du joint conique, on a fortement comprimé de larges rondelles circulaires en chanvre graissé, au moyen de deux plaques en fonte réunies par des boulons à écrous. Cet appareil, facile à visiter et, par conséquent, à entretenir, intercepte tout passage à l'air et à l'eau.

Malgré les soins les plus minutieux, les assemblages des différentes parties d'un tube assez long ne sont jamais parfaits; les plus petites imperfections deviennent sensibles à la longue, surtout lorsque les tuyaux sont enterrés ; on parvient donc difficilement, sous une pression assez forte, à empêcher complétement l'introduction de l'air dans un siphon ; les bulles se réunissent au sommet, et diminuent la grandeur de la section d'écoulement ; elles peuvent même, par suite d'une trop grande agglomération, interrompre la continuité de la colonne d'eau, et arrêter l'alimentation de l'appareil. Le récipient (fig. 53), placé au-dessus de la partie la plus élevée du tube, et rempli d'eau en même temps que celui-ci, était destiné à recueillir les bulles intérieures en dehors de la circulation du courant. Ce récipient était muni d'un flotteur, d'une aiguille indicatrice et d'un tube en verre, afin d'indiquer le moment où il fallait expulser l'air qu'il contenait pour alimenter le siphon et assurer la régularité de son écoulement.

Afin de mettre un siphon en activité, il faut chasser l'air contenu dans le tube, ce qui permet à l'eau d'entrer, et de rester suspendue dans les branches de l'appareil, en vertu de la pression atmosphérique.

Dans les petits siphons à faible section, cette opération n'offre aucune difficulté : on bouche les deux orifices inférieurs par des tampons provisoires, et on charge par le sommet ; ensuite on ferme hermétiquement l'ouverture du haut, on enlève les tampons, et l'appareil fonctionne. Pour les siphons plus forts, il ne peut en être ainsi ; la quantité d'eau à introduire est trop considérable, et l'opération précé-

dente demande un temps assez long ; le placement des tampons devient trop difficile, il est même souvent complétement impossible, quand l'un des bassins dans lequel aboutit le tube est soumis aux fluctuations des marées, et que l'orifice se trouve, par conséquent, à une trop grande profondeur sous le niveau. Ensuite, pour des siphons permanents, qui ne doivent agir qu'à des intervalles assez éloignés, l'opération laborieuse du rechargement devrait se renouveler probablement à chaque manœuvre, puisque le plus petit défaut dans les soudures fournira une prise d'air qui, aussi faible qu'elle soit, suffira à la longue pour remplir le siphon et chasser toute la colonne d'eau qu'il contient.

On a évité ces inconvénients, en installant une pompe aspirante, ou pneumatique (fig. 53), au-dessus du récipient ; elle permettait de mettre le siphon en activité à chaque instant de la marée, et d'expulser très-facilement l'air accumulé dans le réservoir. Le travail d'un homme, agissant pendant six ou dix minutes, suivant la hauteur de la marée, suffisait pour opérer le vide dans tout l'appareil.

Nous croyons utile de faire remarquer que le piston cylindrique en métal, glissant dans une boîte à bourrage, tel qu'il est indiqué aux dessins, semble être le système le plus convenable pour les pompes à air des siphons ; ceux qui sont garnis en cuir ne sont bons que lorsqu'ils sont constamment immergés, le gonflement du cuir assure alors un contact intime avec le corps de pompe, et permet l'aspiration ; dans un siphon, où il n'y a que de l'air à soutirer, le piston en cuir se dessèche, se contracte, et bientôt il ne fonctionne plus. Les pistons cylindriques à segments, comme ceux des machines à vapeur, sont trop compliqués pour des ouvrages du genre de celui dont il s'agit ici. Les pistons cylindriques, au contraire, sont fort simples, n'exigent aucun soin ni entretien, et il suffit de serrer quelque peu les vis de la boîte à étoupes pour rétablir une adhérence parfaite.

La soupape d'échappement (fig. 53) se trouve sous le piston, au niveau de la soupape intérieure, pour permettre à l'eau, qui monte avec les derniers coups de pompe, quand on fait le vide dans le siphon, de se dégager immédiatement au dehors sans diminuer la course du piston.

Les soudures de chaque partie du tube étaient éprouvées avant le

recomblement des excavations, par une pompe foulante installée dans la loge du mécanisme; la pression d'épreuve était d'une atmosphère et demie.

*Manœuvre du siphon.* — Lorsqu'on a rempli d'eau les deux cuvettes, soutiré l'air intérieur au moyen de la pompe, et fait monter l'eau jusqu'au sommet du tube, l'appareil se met en activité aussitôt que le niveau de la marée surmonte la cuvette placée du côté de l'Escaut, et que la pression devient assez forte pour soulever le clapet horizontal qui est au fond de la cuvette du fossé ; le mouvement du courant s'accélère alors insensiblement avec l'accroissement de hauteur de la marée et diminue avec elle. Quand la marée est redescendue au niveau du fossé, l'alimentation s'arrête; le clapet, cessant d'être soutenu, retombe par son propre poids, et empêche le siphon de fonctionner au rebours; il retient les eaux du fossé, qui sans cela retourneraient vers l'Escaut. Dans cette situation, et durant tout le temps de la marée basse, la colonne d'eau reste dans le tube, parce que les parties supérieures des deux cuvettes sont placées exactement à la même hauteur, et que les deux branches du siphon, ayant la même hauteur, se soutiennent mutuellement en équilibre.

Quand la marée est remontée de nouveau jusqu'à la hauteur des eaux dans le fossé, l'appareil recommence à fonctionner, et l'alimentation se continue ainsi indéfiniment, sans qu'il soit nécessaire de s'en occuper autrement qu'en expulsant de temps à autre l'air accumulé dans le récipient. Pour arrêter le mouvement du courant et mettre le siphon hors d'activité, on se sert du grand robinet.

Le petit robinet, placé sous la pompe, sert à mieux fermer les joints supérieurs du mécanisme, et quand le vide est fait, permet de décharger le siphon à volonté ; il facilite encore la visite et les réparations de la pompe.

*Calcul de la dépense d'eau.* — M. Ablay a fait un grand nombre d'expériences pour mesurer les vitesses d'écoulement correspondant à diverses charges ou hauteurs d'eau des marées.

A cet effet, les parois verticales de la cuvette du fossé ont été relevées sur leur pourtour par un cadre en planches, réuni lui-même à un coursier de 5 mètres de longueur dont le plafond venait affleurer la partie supérieure des tôles de la cuvette et s'abaissait à son autre

extrémité. L'appareil étant ainsi disposé, toute la masse d'eau fournie par le siphon devait forcément suivre le coursier avant de s'écouler dans le fossé.

La vitesse du courant a été mesurée au moyen d'un moulinet à ailettes très-léger, monté dans un châssis en fer, et glissant dans deux rainures verticales, ménagées à l'intérieur des parois latérales du coursier. L'axe de rotation du moulinet était muni d'une double came qui soulevait un petit marteau compteur retombant, à chaque demi-révolution, sur la monture en fer de l'instrument. Celui-ci était placé à un mètre de l'extrémité du coursier, c'est-à-dire à l'endroit où le courant cheminait parallèlement au plafond, et l'on avait soin de le relever ou de l'abaisser à chaque observation, pour immerger constamment les ailettes de la même manière.

Le tarage du moulinet a été exécuté par l'observation de la masse totale d'eau écoulée dans le fossé pendant une marée entière, et par une série d'observations successives faites au moment où la marée atteignait les cotes $0^m10$, $0^m20$, $0^m30$..... au-dessus de la cuvette du fleuve; celles-ci commençaient avec le flux et finissaient avec le reflux, et la vitesse du courant était mesurée chaque fois pendant deux minutes. La surface du fossé était levée avec soin, et on conservait les talus dans un état convenable d'imbibition en élevant les eaux, dans l'intervalle des expériences, jusqu'à hauteur de l'extrémité du coursier.

Si l'on représente par :

$Q'$ la masse totale recueillie pendant la durée des expériences partielles correspondant au flux d'une marée;

$U$ la vitesse du compteur, ou l'espace parcouru par le courant dans le coursier, pendant une demi-révolution de l'instrument;

$n$ le nombre de demi-révolutions comptées pendant deux minutes;

$L$ la largeur constante du coursier;

$h, h'$..... la hauteur variable de la section du courant à l'emplacement du compteur;

$m, m'$..... la masse d'eau écoulée dans le fossé pendant chaque observation successive;

l'on aura les relations suivantes :

$$nRLh = m$$
$$n'RLh' = m'$$
$$n''RLh'' = m''$$
etc.

$$Q' = RL\left(nh + n'h' + n''h'' + \ldots\ldots\ldots\right)$$
$$R = \frac{Q'}{L(nh + n'h' + h''n'' + \ldots\ldots\ldots)}$$

L'instrument étalonné, l'on obtenait facilement la valeur des masses $m$, $m'$, $m''$..... au moyen du nombre de demi-révolutions $n$, $n'$, $n''$..... correspondant aux hauteurs $h$, $h'$, $h''$....., et par suite la dépense d'eau par seconde pour ces mêmes charges, ou :

$$\frac{m}{120}, \quad \frac{m'}{120}, \quad \frac{m''}{120}, \ldots\ldots\ldots$$

L'auteur a recueilli ces dernières quantités pour des charges de $0^m10$ à $2^m40$ de hauteur, variant entre elles de $0^m10$.

Ces données lui ont servi à déterminer la valeur du coefficient $m$ de la dépense théorique Q, dans l'équation :

$$Q' = mQ$$

Ce coefficient ne convient évidemment qu'à des siphons identiques à celui du fort Sainte-Marie, et dans des circonstances analogues.

La valeur $m = 0{,}90$, trouvée par M. Ablay, est plus faible que celle à laquelle nous arrivons par notre théorie ; ce résultat provient de ce que l'auteur n'a pas tenu compte de la perte de vitesse due à l'étranglement de l'entrée.

Ainsi que nous l'avons vu, l'équation générale qui détermine la vitesse du régime est la suivante :

$$U^2\left(\frac{3}{2} + 0{,}0123\, n \sin.^2 \alpha\right) = 2gH$$
$$- \frac{2\chi L}{\Omega}\left[\frac{\left(0{,}00032 + \frac{0{,}000{,}000{,}0376}{r^2}\right)U + \left(0{,}00443 + \frac{0{,}000{,}062}{r}\right)U^2}{2}\right]$$

Pour appliquer cette équation au siphon du fort Sainte-Marie, on devra faire :

$$n = 5 \qquad \chi = 2\pi r$$
$$c = 0{,}15 \qquad \Omega = \pi r^2$$
$$R = 0{,}20 \qquad r = 0{,}10$$
$$g = 9{,}808 \qquad L = 36$$

Pour obtenir sin. $\alpha$, on posera successivement :

$$\pi r : c = 180^\circ : \alpha$$
$$0{,}6283 : 0{,}15 = 180^\circ : \alpha$$
$$\alpha = 43^\circ$$
$$\sin.\ \alpha = \sin.\ 43^\circ = 0{,}682$$
$$R = 5 \times 0{,}0123 \times \overline{0{,}682}^2\, U^2$$
$$R = 0{,}0285\ U^2$$

L'équation générale devient donc ici :

$$U^2\left(\frac{3}{2} + 0{,}0285\right) = 19{,}616\ H - 1440\left(0{,}00016188\ U + 0{,}002525\ U^2\right)$$
$$U^2 + 0{,}045\ U - 3{,}79\ H = 0$$

D'où l'on conclut :

$$U = -0{,}0225 + \sqrt{0{,}000506 + 3{,}79\ H}$$

Le premier terme sous le radical pouvant être négligé sans erreur sensible, l'on aura :

$$U = -0{,}0225 + 1{,}95\sqrt{H}$$

La dépense théorique par seconde, ou Q, est donc exprimée par la relation :

$$Q = \pi r^2\left(-0{,}0225 + 1{,}95\sqrt{H}\right) \ldots\ldots\ldots (m)$$

Désignant par $m$ le coefficient de correction résultant de l'influence des bouillonnements et des remous, la dépense pratique Q′ par seconde aura pour valeur :

$$Q' = m\pi r^2\left(-0{,}0225 + 1{,}95\sqrt{H}\right) = m \times 0{,}031415\left(-0{,}0225 + 195\sqrt{H}\right)$$

Le tableau suivant indique, pour quelques hauteurs observées, les

volumes Q obtenus par l'équation (*m*), et les dépenses Q' correspondantes résultant des expériences faites par M. Ablay sur le siphon.

| Différence H du niveau entre les deux bassins. | Dépense théorique Q. | Dépense Q' moyenne, résultant des expériences. | Valeur du coefficient *m*. | Observations. |
|---|---|---|---|---|
| mètres | mètres cubes. | mètres cubes. | | |
| 0,50 | 0,0427 | 0,0420 | 0,9836 | |
| 0,80 | 0,0544 | 0,0534 | 0,9816 | |
| 1,20 | 0,0666 | 0,0657 | 0,9865 | |
| 1,70 | 0,0796 | 0,0785 | 0,9862 | |
| 2,00 | 0,0862 | 0,0853 | 0,9896 | |
| 2,40 | 0,0942 | 0,0932 | 0,9893 | Marée haute ordin. |

Il résulte du tableau précédent que la valeur moyenne du coefficient de correction, pour le cas considéré, serait à peu près 0,984.

# CHAPITRE ONZIÈME.

## ÉCLUSES MARITIMES ORDINAIRES.

---

### DESCRIPTION GÉNÉRALE.

Une écluse est un pertuis ou chenal destiné à établir la communication entre deux bassins à niveaux variables, communication qu'on peut interrompre, à volonté, par un système de portes ou de vannes.

Les écluses maritimes peuvent se classer comme suit : 1° écluses ordinaires, ou d'accession, d'inondation, ou de bassin à flot; 2° écluses de chasse; 3° écluses militaires. Elles présentent de légères différences suivant les conditions qu'elles ont à remplir, mais diffèrent essentiellement toutes des écluses de canaux de navigation, en ce qu'elles n'ont pas de chute, et qu'elles n'exigent pas de sas.

Les écluses d'accession et de bassin à flot servent à établir la communication entre un canal ou un bassin à flot et les eaux de la mer.

Elles se composent d'un chenal revêtu en maçonnerie, et muni de portes busquées qui, étant fermées à marée haute, retiennent ensuite l'eau dans le bassin pendant le reflux ou jusant. Ces portes de retenue s'appellent *portes d'ebbe*.

Une écluse de flot doit être munie de deux paires de portes d'ebbe, non pas dans le but de former sas, mais afin qu'elles puissent se suppléer en cas d'accident ou de réparation. Parfois aussi elles sont nécessaires quand la hauteur d'eau à retenir est considérable; on répartit alors la charge sur chacune d'elles en établissant un niveau intermé-

diaire *ab* (fig. 55), dans l'intervalle compris entre les deux paires de portes AB et CD. Lorsque la surface du bassin est très-grande par rapport à celle de la partie *ab* de l'écluse, on peut utiliser ce niveau intermédiaire pour lui faire remplir les fonctions de sas.

Du reste, dans quelques grandes villes maritimes, l'on a ajouté un sas aux écluses des bassins à flot, afin de permettre l'entrée et la sortie des navires de faible tonnage, alors qu'ils trouvent en aval de l'écluse, c'est-à-dire vers la mer, un tirant d'eau suffisant pour naviguer ; on peut ainsi accorder tout le temps du plein aux mouvements des grands navires.

Souvent l'entrée d'une écluse de flot est munie d'un autre système de portes, busquées vers l'aval et désignées sous le nom de *portes de flot*. Elles sont d'ordinaire ouvertes, et s'appliquent contre les murs de revêtement ou bajoyers du passage ; on ne les ferme que lorsqu'on veut empêcher les marées extraordinaires de bouleverser les eaux du bassin, ou lorsqu'on doit exécuter à celui-ci des réparations qui exigent son épuisement complet ou partiel.

La largeur du passage d'une écluse de ce genre varie suivant la destination du bassin intérieur, et dépend de la largeur des navires ou des vaisseaux auxquels elle doit donner accès. L'ouverture des écluses à flot a considérablement augmenté depuis la création des grands steamers transatlantiques. L'invention de l'hélice n'a guère contribué à diminuer cette dimension, car les forts vapeurs à grande vitesse conservent d'ordinaire les roues à aubes simultanément avec le propulseur hélicoïdal. En 1860, il a été construit en Angleterre une écluse de 30 mètres d'ouverture, afin de permettre l'entrée du bassin au steamer transatlantique l'*Adriatic*, dont la largeur dépasse 27 mètres.

La longueur d'une écluse de bassin à flot dépend du nombre de portes qu'on veut y placer ; d'ordinaire, elle peut recevoir une paire de portes de flot et deux paires de portes d'ebbe.

## DESCRIPTION RAISONNÉE.

*Fondations.* — La question si importante des fondations d'écluses a été traitée d'une façon remarquable par *Bélidor*, dans son *Architec-*

*ture hydraulique.* Quelques modifications ou méthodes nouvelles ont cependant été adoptées depuis quelque temps ; nous citerons entre autres les fondations par béton immergé, avec batardeaux de même espèce.

La charge superficielle des bajoyers étant inférieure à celle que supportent les fondations de la plupart des constructions hydrauliques, c'est donc moins à ce point de vue que sous le rapport de la sous-pression des eaux qu'il est nécessaire de considérer le problème à résoudre

L'expérience a fait connaître les diverses précautions à prendre, suivant l'espèce de terrain, pour prévenir les conséquences désastreuses des filtrations et des affouillements.

Quoique nous soyons entrés dans des développements étendus, tant au chapitre IX que dans les applications militaires, nous les compléterons, en empruntant à l'expérience et à la longue pratique d'un éminent ingénieur la classification et les considérations suivantes (1).

1° *Sur rocher.* — Bien unir la maçonnerie au rocher, au moyen d'enracinements (fig. 41 ) descendant en contre-bas du radier. Si la roche est très-dure, on peut se dispenser de faire un radier ; mais, dans tous les cas, il est nécessaire de maçonner les buscs, et même les chambres des portes.

2° *Terrain ferme, mais attaquable.* — Les filtrations à travers le terrain n'étant pas à craindre, il suffit d'un radier de 0m20 à 0m30 formant revêtement, et destiné à empêcher l'action supérieure de l'eau en mouvement. Un garde-radier sera utile pour prévenir l'introduction de l'eau entre le sol et le radier.

3° *Terrain incompressible, mais affouillable.* — Tels sont les terrains de sables, graviers, etc.

Dans ce cas, la fondation peut s'établir directement sur le sol ; le radier doit être calculé comme nous l'indiquerons plus loin, et il devient indispensable de s'opposer aux fitrations par des garde-radiers, en béton ou en maçonnerie, descendant plus bas que les fondations générales, aux têtes de l'écluse et sous les buscs ; on peut aussi remplacer ces

(1) M. Minard. *Cours de construction.*

garde-radiers par des panneaux en palplanches jointives, ou réunir les deux préservatifs. Le radier doit avoir une surépaisseur sous le busc et les chambres dans les écluses de chasse.

4° *Même terrain, mais traversé par de nombreuses sources.* — Après avoir déblayé jusqu'à ce que les épuisements soient trop coûteux, on achèvera la fouille des fondations par le draguage. On en dressera le fond en pente convenable pour l'écoulement ultérieur, en relevant un peu les bords sur le pourtour, et on creusera immédiatement des puisards de décharge dans la partie basse. On recouvrira ensuite le tout d'une couche de 0m30 à 0m50 de béton, de façon à avoir une espèce de grande cuvette plate imperméable, dans laquelle on épuisera après une prise complète des mortiers. Nous avons indiqué au chapitre VIII les méthodes employées pour couler le béton, ainsi que les précautions à prendre pour obtenir un massif bien homogène.

Le béton appliqué sur le terrain étouffe ou atténue les sources de fond, et rend les épuisements moins dispendieux. Ainsi, M. Minard rapporte que, dans un cas semblable, dix vis d'Archimède avaient suffi pour mettre à sec une fouille recouverte de 0m40 de béton, tandis que dix-sept vis de même force n'avaient pu gagner au delà de 0m70 au-dessus du fond vif de cette fouille.

Si les fondations sont beaucoup au-dessous du niveau des sources, on devra, après le draguage, battre une enceinte de pilots et de palplanches au pied des grands talus de la fouille, un peu agrandie en conséquence; puis, on coulera une aire en béton de 0m60 à 1m00 d'épaisseur. Ensuite, au moyen d'échafauds, portant sur les têtes des pilots d'enceinte qui dépassent le niveau des sources, on plantera dans le béton des poteaux verticaux ou inclinés (fig. 56), qui serviront à soutenir des panneaux de façon à former une seconde enceinte intérieure, formant avec la première un encoffrement périmétrique, qu'on remplira de béton jusqu'au niveau des sources, en soutenant l'extérieur par des remblais. On aura ainsi une enceinte de batardeaux, au milieu de laquelle on épuisera après la prise complète. Les poteaux et panneaux étant enlevés, on exécutera la maçonnerie.

Les massifs de béton de l'encoffrement, taillés en retraite si les poteaux ont été inclinés, feront partie des bajoyers. Pour ouvrir le

passage de l'écluse, ils seront ruinés sous l'eau, à la tête d'aval dans les écluses des canaux, à moins toutefois que, par économie, on n'ait rempli cette partie des batardeaux en terre glaise plus facile à enlever.

Si l'on craignait de fendre le béton en enfonçant les poteaux, on pourrait contre-butter leurs pieds par de longues pièces de bois *aa* (fig. 56) allant d'un batardeau à l'autre.

Les poteaux intérieurs doivent être peu inclinés. Si on leur donne une forte inclinaison, on emploie moins de béton, mais le mélange qui remplit l'angle aigu de l'encoffrement ne peut y arriver qu'en coulant par un talus naturel, et en y accumulant toute la laitance, inconvénient qu'on évite par des panneaux verticaux ou peu inclinés.

Nous donnerons, dans la *Troisième partie,* une application militaire très-détaillée de ces fondations sur radier général en béton.

5° *Terrain compressible jusqu'à douze mètres.* — Pilotis, grillage, plancher sous les radiers seulement, et maçonnerie par-dessus ; files transversales de palplanches, principalement sous les buscs; éviter, dans le grillage, les pièces continues de l'amont à l'aval, qui sont des causes de filtrations par le tassement des terres rapportées sous ces pièces parallèles à la longueur de l'écluse.

6° *Terrain compressible indéfiniment.* — Tels sont certains terrains de glaise, tourbe, vase, sable boulant, etc.

Il faut alors donner un grand empatement à la fondation. Après avoir exécuté les déblais et les épuisements, ces derniers en tout ou en partie, on fera une enceinte de pilots jointifs ou de palplanches, puis un enrochement de moellons pilonnés dans l'intérieur, et on coulera une couche de béton pour comprimer les sources. On peut aussi battre un grand nombre de petits pilots, le gros bout en bas, et en allant du périmètre au centre de la fouille ; puis réunir leurs têtes par un grillage et un plancher général.

Lorsque la couche de béton coulé sur le moellonnage ne parvient pas à atténuer suffisamment la puissance des sources, on construit le radier par parties, en concentrant les moyens d'épuisement dont on dispose.

Si l'épuisement, même partiel, était reconnu impossible, ou bien, si l'on avait lieu de craindre qu'en enlevant l'eau le fond de la fouille ne vînt à se relever, l'on aurait recours à une fondation par caisson,

sur une couche plus épaisse de béton coulé, dans une fouille faite au préalable à la drague.

*Bajoyers.* — Nous avons discuté, au chapitre VII, l'épaisseur et la section à donner aux murs de revêtement en général. Les considérations émises et les conclusions posées s'appliquent spécialement aux bajoyers d'écluses.

La forme transversale de la quille des navires permet de donner un certain fruit aux parements extérieurs, et même de les raccorder en courbe (fig. 57) avec le fond du passage ou radier de l'écluse. Comme nous le verrons plus loin, ce rétrécissement est très-favorable à la solidité du radier et à la rigidité des entretoises inférieures des portes. Aussi, était-il jadis fréquemment en usage; et aujourd'hui encore on l'emploie, surtout en Angleterre, pour les écluses à larges ouvertures des bassins militaires ou des grands bassins de commerce.

Le talus intérieur est généralement disposé en gradins horizontaux.

Les bajoyers sont terminés par un mur en retour ou par un mur en aile, ou enfin par une partie courbe, formant les têtes ou musoirs de l'écluse. Les murs en retour d'équerre à l'axe sont le plus fréquemment employés aujourd'hui ; ils se raccordent avec les bajoyers par de petits pans coupés ou par des musoirs de $0^m50$ à $0^m80$ de rayon.

Lorsqu'une écluse se compose de plusieurs passages parallèles et accolés, ce qui se présente souvent pour les écluses de chasse ou d'inondation, on sépare ceux-ci par des piles de $1^m20$ à $1^m50$ d'épaisseur, dont la coupe horizontale est un rectangle terminé à ses extrémités par un massif appelé *avant-bec* en amont, et *arrière-bec* en aval. Ces becs s'élèvent jusqu'au-dessus des plus hautes eaux, afin de préserver la pile du choc des glaçons et des corps flottants. Ils sont parfois surmontés de demi-cônes comme ceux des piles de ponts.

Les becs ne sont pas seulement destinés à préserver les têtes des piles, mais aussi à faciliter, par leur forme, le passage de l'eau, de façon à diminuer la contraction et les bouillonnements, et par suite les affouillements. Cette considération est surtout importante dans les écluses de chasse.

La forme qui satisfait le mieux aux conditions précédentes est celle des proues et poupes des bateaux. A la suite d'expériences directes sur des piles de diverses formes, *Gauthey* a reconnu que, pour les avant-

becs, la forme rectangulaire était la plus défavorable; que la forme d'un triangle rectangle favorisait peut-être encore plus les affouillements; que celle en demi-cercle était un peu meilleure; que le triangle équilatéral l'était davantage, et qu'une forme préférable encore à cette dernière était composée de deux arcs de cercle tangents aux faces de la pile et ayant leurs centres respectifs sur ces faces.

Les expériences de Gauthey conduisent à adopter la forme triangulaire équilatérale, ou mieux celle en arcs de cercle; mais les angles aigus qu'elles présentent aux chocs des glaces, etc., sont promptement endommagés; aussi donne-t-on en général la préférence aux avant-becs demi-circulaires ou elliptiques.

Afin que les portes, quand elles sont ouvertes, ne fassent pas saillie sur les parements des bajoyers, on met ceux-ci en retraite d'une quantité au moins égale à l'épaisseur des portes et sur une longueur un peu plus grande que la largeur de ces dernières; ces logements portent le nom d'*enclaves*.

Dans les écluses de largeur ordinaire, on refouille dans le parement de chaque bajoyer, vers les têtes d'amont et d'aval, des *coulisses* verticales servant à établir un barrage avec des pièces de bois allant d'une coulisse à l'autre. Ces barrages sont destinés à permettre les réparations du passage. Lorsque les coulisses n'ont que les dimensions ordinaires, c'est-à-dire $0^m15$ à $0^m20$ de profondeur sur $0^m20$ de largeur, on peut les refouiller dans la pierre de taille; mais pour des dimensions plus grandes il faudrait, de deux en deux assises, mettre un joint dans la coulisse.

Quand le passage est trop large pour qu'on puisse le barrer au moyen de poutrelles, par exemple dans les écluses militaires, on a recours à d'autres systèmes, parmi lesquels nous citerons l'emploi d'un *bateau-porte* analogue à celui dont on se sert dans les ports de Londres, Hull, Cherbourg, etc.

Outre les coulisses des têtes, la plupart des écluses militaires, de largeur ordinaire, possèdent, vers le milieu de chaque bajoyer, deux rainures verticales, espacées entre elles de $1^m50$ à $2^m50$, afin de permettre la formation d'un barrage de sûreté en terre, pour le cas où les projectiles ennemis menaceraient de détruire les portes de retenue.

Entre les enclaves et les coulisses, il faut laisser une épaisseur suffi-

sante pour résister à la pression des barrages contigus; cette séparation ne doit guère avoir moins de 0m60, de même que la distance à conserver entre la coulisse et le mur en retour.

La hauteur des bajoyers dépasse ordinairement de quelques décimètres le niveau des vives eaux d'équinoxes. Il faut éviter d'en placer le couronnement en saillie, parce que les navires pourraient parfois en ébranler et en soulever les pierres. Il faut aussi avoir soin de faire en pierre de taille tout le couronnement et toutes les parties formant des angles verticaux vifs ou arrondis, à cause des chocs auxquels ces endroits sont exposés. La distance d'un joint montant à un angle rentrant ne doit pas être inférieure à 0m05, et l'épaisseur horizontale d'une pierre formant un angle saillant doit au moins être égale à la saillie de la pierre. Les parties qui composent le couronnement de tous les murs doivent avoir des dimensions suffisantes pour résister à la poussée des terres à l'époque des gelées; le minimum qu'on puisse donner est 0m40 d'épaisseur sur 0m75 de largeur; dans ce dernier cas, il est nécessaire de goujonner les pierres. On fait aussi quelquefois le couronnement en hérisson. Les musoirs doivent être en pierre de taille jusques et y compris les poutrelles, et se composer de matériaux de fortes dimensions.

A l'exception des chaînes en pierre de taille placées aux points où se trouvent des angles, le parement du reste des bajoyers peut être construit en moellons ou en briques. Les pierres de taille doivent se relier parfaitement avec les autres parties de la maçonnerie; aussi, doit-on veiller à ce que les joints verticaux de chacune d'elles ne correspondent pas aux joints des pierres voisines.

Les parements des bajoyers doivent être exécutés en matériaux durs et non attaquables par la gelée. Afin de bien les relier avec la maçonnerie de remplissage qui pourrait se trouver derrière eux, on dispose de distance en distance une boutisse de 0m80 à 1m00 de queue. L'épaisseur de la partie non gélive du parement doit être d'au moins 0m60.

Le massif des bajoyers peut être fait en moellons, et encore mieux, en briques dont la maçonnerie est plus pleine.

Il est très-important que les parements soient construits avec du mortier éminemment hydraulique, afin d'éviter les chambres qui tendent à se former derrière eux, par suite des variations du niveau des

eaux. Lorsqu'ils sont exécutés en briques, celles-ci doivent être dures et bien cuites, faisant généralement feu au briquet. Il ne faut jamais employer des chaînes verticales en pierre de taille, mais il est bon d'en disposer horizontalement à la hauteur où les navires frottent le plus souvent.

On peut aussi placer en échiquier des boutisses en pierre de taille pour soutenir la brique. Il ne faut pas risquer cependant de sacrifier l'égalité du tassement à des conditions d'une utilité insignifiante.

Vis-à-vis les enclaves des portes, les bajoyers doivent avoir la même épaisseur qu'aux autres parties de leur développement; leurs parements du côté des terres reculent donc de la profondeur de l'enclave qui a $0^m10$ de plus que l'épaisseur des portes et environ $0^m15$ de plus que leur longueur.

De même que dans les aqueducs, on donne une surépaisseur au droit des vannes et des coulisses; elle varie de $0^m20$ à $0^m40$.

Lorsque l'écluse a une grande longueur, on renforce quelquefois les bajoyers par un système de contre-forts, ayant $1^m20$ à $1^m30$ de largeur sur $0^m80$ à $1^m00$ de queue, et espacés d'environ $3^m50$ d'axe en axe (fig. 89.)

On a essayé, en Angleterre, de remplacer les parements en maçonnerie par des plaques en fonte, assemblées par leur rebord, et ayant $3^m00$ sur $1^m50$. Elles sont consolidées contre la poussée des terres au moyen de tirants en fer, qui leur sont boulonnés et qui sont fixés à des pilots battus à $3^m00$ en arrière. Des contre-fiches en bois arc-boutent les pilots et les plaques, et empêchent le mouvement en sens contraire.

Ces écluses, qui datent des premières années de ce siècle, sont exposées à céder en même temps que les ancrages, lorsque les pilots n'offriront plus de résistance suffisante; leur durée doit donc varier avec la rapidité de pourriture de ces derniers qui, à ce point de vue, sont évidemment placés dans des conditions d'autant plus défavorables qu'ils n'ont pas été préparés à la créosote, ou à tout autre antiseptique puissant.

*Radier.* — Un radier peut être considéré comme une solive encastrée à ses extrémités sous les bajoyers, et sollicitée uniformément, sur toute sa longueur, par la différence entre son propre poids et celui de

la colonne d'eau qui tend à le soulever. Alors, de cette différence de poids et des formules suivantes (1) :

$$f = h\frac{\sqrt{KK'} - K'}{K - K'}$$

$$\frac{PC}{4} = K_1 a f^2$$

on déterminera l'épaisseur $h$ du radier, en prenant pour K, K' et $K_1$ les valeurs qui conviennent au mortier employé.

Dans ces formules, on a représenté par :

$f$ la distance de l'axe de rupture, ou des fibres invariables, à l'horizontale extrême de la partie soumise à l'extension, dans une section normale quelconque de la solive;

$h$ l'épaisseur du radier ;

$a$ la longueur du radier ;

P le poids total qui tend à soulever le radier, et qui est le produit de la projection horizontale de ce dernier par le poids d'une colonne d'eau ayant un mètre carré de base, et pour hauteur celle de l'eau au-dessus de la surface inférieure du radier ;

C la moitié de la largeur du passage;

K la charge de rupture par extension, par mètre carré de surface, pour le mortier employé;

K' la charge de rupture par écrasement ;

$K_1$ l'effort permanent d'extension que ce mortier peut subir sans altération ni danger.

(1) *Traité sur la résistance des matériaux.* E. Roffiaen. 1858.

Voici, d'après Vicat, les résistances de quelques mortiers dont l'usage est le plus fréquent.

| MORTIERS. | EXTENSION | | COMPRESSION | |
|---|---|---|---|---|
| | K | $K_1$ | K' | $K'_1$ |
| | kil. | kil. | kil. | kil. |
| En chaux grasse et sable ; bonne qualité ; 14 ans d'âge . . . . . | 42000 | 4200 | 490000 | 49000 |
| En chaux grasse et sable ; qualité très-médiocre. . . . . | 7500 | 750 | | |
| En chaux moyennement hydraulique et sable. . . . . | 90000 | 9000 | 740000 | 74000 |
| En chaux éminemment hydraulique et sable. . . . . | 150000 | 15000 | 1440000 | 144000 |

Si l'on prend pour K et K' les valeurs correspondant au mortier éminemment hydraulique, les formules deviennent :

$$f = 0{,}76\, h$$
$$PC = 34656\, ah^2$$

D'où l'on conclut :

$$h = \frac{1}{186}\sqrt{\frac{PC}{a}}$$

Ou bien, en représentant par P' la pression de la colonne d'eau par mètre carré de surface :

$$h = \frac{1}{186}\sqrt{P'C^2} = \frac{C}{59}\sqrt{P'}$$

qui devient, pour une hauteur d'eau égale à H, exprimée en mètres :

$$h = \frac{C}{186}\sqrt{1000\,H} = 0{,}17\,C\sqrt{H}$$

Lorsque H = 4 et C = 1,25, comme dans l'écluse d'inondation de la nouvelle citadelle du Nord à Anvers, la formule précédente donne pour épaisseur *h* du radier :

$$h = 0^m{,}425$$

Dans les écluses maritimes, le maximum de pression à envisager correspond aux marées hautes ordinaires, les vives eaux d'équinoxes devant être considérées comme des exceptions, auxquelles on peut se dispenser d'avoir égard.

Suivant M. Minard, il est rare que la sous-pression des eaux agisse sur toute la surface du radier d'une écluse. D'après lui, le soulèvement ne doit pas se mesurer par la hauteur à laquelle l'eau s'élève dans le bief d'amont, ou par celle que tendent à prendre les eaux des sources. Il en donne comme preuve ce qui a lieu dans la construction des radiers au moyen de béton coulé au-dessus duquel on épuise. Il arrive souvent, dit-il, que la couche de béton a un poids moindre que la tranche d'eau qui le recouvrirait, si les sources remontaient à leur niveau naturel, ainsi que le démontrent celles qu'on est quelquefois forcé d'encaisser. Après avoir cité quelques exemples de bétons qui n'ont point été soulevés par des sous-pressions mesurées par les hauteurs auxquelles tendaient à remonter les sources, il ajoute : « comme « ces bétons ne pesaient pas autant que le volume d'eau qui les com- « primait de bas en haut, ils eussent été soulevés infailliblement si la « sous-pression totale avait été égale au produit de leur surface par la « hauteur à laquelle remontaient les sources ; il est vraisemblable que « le béton était soudé au terrain en plusieurs endroits, et que là où « il adhérait la sous-pression ne se faisait pas ressentir. »

La conclusion de M. Minard pourrait sembler fondée si le radier devait faire simplement équilibre par son poids à celui de la masse d'eau qui tend à le soulever. Mais une telle hypothèse n'est pas admissible, attendu qu'elle ne tient aucun compte de la liaison qui existe entre le radier et les bajoyers, et qu'elle annihile complétement le rôle du mortier.

Lorsque la construction repose sur un grillage avec plancher, on peut réduire l'épaisseur du radier, la maçonnerie n'étant alors qu'une enveloppe préservant le plancher et le chargeant de son poids. Les traversines engagées sous les bajoyers résistent au soulèvement, et le plancher arrête les filtrations.

Si le radier est en maçonnerie et fondé sur pilotis et grillage, il ne faut pas que les pilots traversent la maçonnerie, parce que le mortier ne faisant pas corps avec le bois, les filtrations s'établissent le long

des pilots, des longrines et des traversines. On remplit les cases du grillage avec des moellons ou du béton, et on établit la maçonnerie au-dessus du grillage, qu'il y ait ou non un plancher.

Les radiers se font souvent en voûte renversée ayant quelques décimètres de flèche, dans le but de reporter la pression contre les bajoyers qui font culées. Mais la petite courbure de ces radiers doit leur donner peu de résistance comme voûtes, et peut-être vaut-il mieux leur donner plus d'épaisseur. Rien n'empêche d'ailleurs de donner aux pierres une coupe de claveaux de plate-bande, pareille à celle qu'auraient eue les voussoirs. Les parties du radier situées dans les chambres ou enclaves des portes sont toujours planes, et s'exécutent le plus souvent en pierre de taille.

Les radiers se construisent généralement en maçonnerie. Il y a un siècle, on les faisait en bois, et cet usage s'est conservé en Angleterre pour les buscs.

La charpente peut être employée dans toutes les parties des écluses qui sont toujours dans l'eau. C'est le système qui se lie le mieux aux fondations, quand elles sont établies sur pilotis.

Pour éviter les filtrations sous les longrines, il faut les placer sur les traversines, sans entailler les premières. On peut se dispenser de longrines sous le radier, et de madriers sous les bajoyers ; mais on doit mettre deux planchers sous les buscs, et quelquefois dans le passage et dans les chambres des portes d'aval, vers la mer.

Afin de prévenir le soulèvement des radiers en bois, il faut engager les traversines sous l'aplomb des bajoyers, y fixer fortement les madriers par des clous et des chevilles fendues à la tête et conicées. Comme les madriers tendent à se lever par leurs extrémités, on fait arriver tous les bouts sur une même traversine et on couvre le joint d'une plate-bande en fer boulonnée à la traversine. Cette précaution est surtout nécessaire dans les garde-radiers.

Le soulèvement des planchers est dû ordinairement à la sous-pression de l'eau ; mais il peut aussi se produire par le gonflement des madriers, posés trop secs et trop serrés parallèlement à l'axe de l'écluse.

Les radiers et les buscs, ainsi que le pied des bajoyers, étant les parties essentielles des écluses et les plus exposées aux dégradations,

on doit les construire avec le plus grand soin, et ne les exécuter qu'en mettant à sec l'emplacement qu'elles doivent occuper.

*Avant-radiers, faux-radiers, garde-radiers.* — Les avant-radiers ne sont que des prolongements du radier, destinés à garantir les entrées des écluses des affouillements qui tendent à se former par la pression et les remous des eaux.

Ces ouvrages ont ordinairement le même genre de construction que le radier; on en diminue l'épaisseur en raison directe de leur éloignement de l'écluse. Leurs dimensions, en épaisseur et en longueur, dépendent de la nature du terrain et de la distance à laquelle s'étendrait la tendance à l'affouillement.

On prolonge souvent les avant-radiers par des parties en enrochement ou en fascines chargées de moellons, appelées *faux-radiers*, et d'une résistance suffisante pour que les pierres ne soient pas enlevées par le mouvement des vagues. Les détails que nous donnons, à ce sujet, dans nos applications militaires, complètent ce qui est relatif à ce genre d'ouvrages.

On désigne sous le nom de garde-radiers les massifs en béton ou en maçonnerie, que l'on établit en travers de l'écluse, sous les têtes des radiers et des avant-radiers, et qu'on descend jusqu'à la profondeur présumée de l'affouillement, ou mieux à quelques décimètres en dessous de ce dernier.

*Buscs.* — Les buscs sont les saillies que l'on établit sur le fond du radier, pour y faire contre-buter le bas des portes. On les appareille en voûte afin de leur donner plus de résistance à la poussée.

Dans les écluses de 2 à 3 mètres de largeur, cette saillie est de $0^m15$ à $0^m20$. Elle augmente avec l'ouverture du pertuis, afin d'éviter le frottement des portes sur le radier, circonstance qui tend à se présenter lorsque le poids de celles-ci est considérable, et que les dispositions prises ne suffisent pas pour les empêcher de baisser du nez. Ainsi, pour les écluses de 6 à 8 mètres d'ouverture, la saillie du busc est de $0^m25$, et elle atteint $0^m30$ pour des largeurs supérieures. Ces dimensions suffisent pour la butée des portes contre les buscs, et pour le jeu au-dessus du radier des enclaves.

La saillie des buscs, sur la ligne transversale passant par les angles des chardonnets, se détermine par cette considération que, plus l'angle

est obtus, moins les portes et leurs enclaves sont longues et moins elles offrent de résistance pour être ouvertes. L'on adopte généralement $\frac{1}{7}$ à $\frac{1}{6}$ de la largeur du passage.

Les buscs doivent être en pierre de taille très-dure, et appareillés en claveaux de plate-bande. Les deux sommiers doivent être engagés sous les chardonnets, et il faut mettre le moins de voussoirs possible. Ceux-ci doivent pénétrer de $0^m40$ au moins dans le radier, et s'étendre dans toute la largeur du busc, de façon que celui-ci ne soit formé que d'une hauteur de voussoir.

Lorsqu'on n'a pas de pierre dure, il est nécessaire de placer, en avant de l'angle saillant, deux pièces de bois, de $0^m20$ à $0^m25$ d'équarrissage, appelées heurtoirs ou garde-buscs, contre lesquelles les portes joignent mieux que contre la pierre, et qui empêchent celle-ci d'être épaufrée par la chute de corps durs et pesants, ainsi que cela s'est présenté à l'écluse intermédiaire des bassins d'Anvers. Ces heurtoirs forçant les claveaux à s'aligner, et s'opposant à leur déplacement, il n'est pas à craindre que l'un de ceux-ci dévie suffisamment pour arrêter la porte et l'empêcher de se fermer. Les heurtoirs s'assemblent à mi-bois à l'angle du busc; on ne les engage pas sous les chardonnets, afin de pouvoir facilement les renouveler. Ils sont fixés aux pierres du busc par des boulons verticaux goujonnés, dont les écrous sont noyés dans le bois. Les joints des heurtoirs avec la pierre sont calfatés. Quelquefois, on a garni la face verticale des garde-radiers d'un cuir épais ou d'un morceau de chanvre tressé, bouilli dans le suif, afin d'obtenir un contact plus intime avec la porte. En Angleterre, on a employé une plaque verticale en fonte, posée contre la maçonnerie du busc, et qui reçoit elle-même un madrier en bois contre lequel la porte vient buter.

Quant à la hauteur à laquelle on doit placer le seuil ou busc, il est évident que, dans les écluses maritimes en général, il est avantageux de le placer au niveau des marées basses. Cependant, dans les écluses d'accession ou de bassin à flot, cette profondeur est relative à celle du chenal, dans lequel les bâtiments doivent trouver autant d'eau que sur le busc, et même davantage. Or on n'est pas toujours maître d'entretenir à une profondeur voulue un chenal exposé aux ensablements. Dans ce cas donc, la limite de l'effet des chasses donne l'abaissement du seuil de l'écluse. Il est d'un autre côté avantageux de rele-

ver plus ou moins les radiers de façon à pouvoir les visiter à marée basse, et les réparer sans grands épuisements.

*Chardonnets.* — Les chardonnets sont les parties des bajoyers destinées à résister à la poussée de l'arête verticale des portes de l'écluse. Cette arête verticale s'arrondit, ainsi que le refouillement du chardonnet contre lequel elle butte; mais, afin d'éviter le frottement de ces parties l'une contre l'autre, dans la manœuvre, on ne place pas l'axe de rotation de la porte dans l'axe du côté arrondi du chardonnet; leur position est telle, qu'il n'y a contact entre la pierre et le poteau-tourillon que lorsque la porte s'applique contre le busc, et que ce contact cesse dès que celle-ci commence à s'ouvrir.

La coupe horizontale du chardonnet doit présenter le prolongement du busc et un arc de cercle tangent, dont le rayon, un peu plus grand que celui du poteau-tourillon, ait son centre placé sur le rayon allant au point de tangence (fig. 58). On fait du côté des bajoyers un petit pan coupé, et on met les parements des enclaves en retraite d'une quantité un peu supérieure à l'épaisseur des portes, afin que celles-ci ne fassent pas saillie sur les murs lorsqu'elles sont ouvertes. Cette précaution n'est indispensable que dans les écluses traversées par des navires.

Les chardonnets doivent être en pierre de taille très-dure, et du plus haut appareil pour éviter les pertes des joints. Quelquefois on les a formés d'une seule pierre; c'est dans le même but que l'on a employé des chardonnets en bois, derrière lesquels on peut construire en pierres de taille de petit appareil. En Angleterre, à Birmingham entre autres, on a défendu les arêtes des chardonnets par des plaques en fonte de $0^{m}10$ d'épaisseur.

Toutes ces précautions deviennent inutiles, lorsque les écluses maritimes ne sont pas destinées à la navigation.

*Aqueducs.* — Les écluses d'accession et de bassin à flot sont munies généralement de deux aqueducs latéraux (fig. 59), servant à établir, entre la mer et le canal ou le bassin, une communication indépendante de l'écluse, et aussi à donner des chasses.

Ces aqueducs, d'assez grande section, sont ménagés vers le milieu de l'épaisseur des bajoyers, et leur radier est établi, autant que possible, au niveau des marées basses.

Quelquefois, on pratique dans les bajoyers d'autres aqueducs, d'une plus faible ouverture que les précédents, et destinés à faciliter la manœuvre des portes (fig. 59 et 60).

L'un de ces aqueducs, établi au niveau du radier des enclaves, commence du côté de la mer, débouche dans les chambres, et sert à faire, à mer haute, des chasses devant les portes, pour enlever la vase qui en gênerait les mouvements.

L'autre, au niveau des buscs, commence du côté du bassin, débouche sur l'estrade du busc, et sert, conjointement avec les ventelles des portes, à chasser à mer basse les dépôts apportés par les marées en aval, c'est-à-dire vers la mer.

La fig. 60 représente la coupe verticale faite dans l'axe d'une écluse de Liverpool. La fig. 59 est relative à une écluse pouvant donner passage à des vaisseaux de ligne d'un tirant d'eau de 7m30.

*Portes busquées.* — La fermeture des écluses d'accession ou de bassins à flot se fait généralement au moyen de portes dites busquées. Ce moyen, qui est le meilleur et le plus en usage aujourd'hui, ne se prête pas facilement à l'augmentation d'ouverture qu'exige la nouvelle navigation à vapeur, quoiqu'il ne s'y refuse pas entièrement.

Les portes busquées se composent de deux vantaux symétriques, butant l'un contre l'autre, et s'appuyant contre les buscs et les chardonnets.

Chaque vantail est formé de deux poteaux : l'un, dit *poteau-tourillon,* porte les pivots et s'applique contre le chardonnet; l'autre, appelé *poteau busqué,* vient s'appuyer, par une face inclinée sur le plan du vantail, contre le poteau de même nom du second vantail. Ces deux poteaux sont reliés par des entretoises horizontales, supportant la pression de l'eau, et dont le nombre dépend de la hauteur de la porte; elles s'assemblent dans les poteaux, et sont recouvertes de madriers jointifs formant le bordage.

Les portes tournent au moyen d'un pivot fixé au pied du poteau-tourillon, et d'un collier placé à sa tête; elles ont quelquefois une roulette près du poteau busqué.

Ainsi construites, les portes busquées ne conviennent qu'à des écluses et des charges très-ordinaires. En effet, comme le poteau-tourillon est la seule pièce qui porte toutes les autres, en l'absence de

roulettes, il arrive que les entretoises tendent à fléchir autour de leur point d'encastrement dans ce poteau, dès que l'ouverture de l'écluse ou la charge d'eau devient plus ou moins considérable. Dès lors, le vantail finit par devenir un losange.

Plusieurs moyens ont été employés pour prévenir ces mouvements et empêcher les portes de *donner du nez.*

L'un d'eux, fréquemment usité autrefois, consiste à relier les entretoises entre elles et aux poteaux par une pièce inclinée, appelée *bracon*, s'étendant du bas du poteau-tourillon au haut du poteau busqué. Ce bracon est, le plus souvent, formé de deux parties : l'une, placée en amont et noyée dans le bordage; l'autre, du côté d'aval, et formée de plusieurs pièces séparées par les entretoises. Chacune de ces pièces est reliée au bracon d'amont par deux boulons, et assemblée à embrèvement dans les entretoises ou les poteaux. Les madriers formant le bordage sont disposés en décharge, parallèlement au bracon, et cloués sur les entretoises et dans les feuillures faites pour recevoir leurs extrémités dans les poteaux et les entretoises inférieure et supérieure.

Quelquefois, le bracon est d'une seule pièce (fig. 69); on ajoute souvent aussi un deuxième bracon, partant du milieu du poteau-tourillon et parallèle au premier. Tous deux s'assemblent alors à tiers-bois sur les traverses. Cette disposition est plus facile ; mais ainsi placées sur le côté, ces pièces font plutôt l'office d'écharpes que de jambes de force par rapport à l'entretoise superieure, et par conséquent au poteau busqué, ce dernier étant essentiellement suspendu sur le tenon de cette entretoise. Il vaut mieux, lorsqu'on fait usage de bracons, les disposer par parties, ainsi que l'indique la fig. 61 ; un troisième bracon serait peu avantageux, à cause de son faible bras de levier. Ce dernier motif doit faire renoncer aussi à l'emploi des taquets, ou corbeaux en bois, placés dans l'angle des traverses supérieures avec le poteau-tourillon, ainsi qu'on l'a fait aux portes busquées des écluses de chasse d'Ostende (fig. 69), où l'on a réuni tous les moyens de consolidation que nous venons d'examiner. Les consoles en fonte, encastrées à la même place, ne valent évidemment pas mieux.

Dans le but de relier le poteau busqué à la partie fixe du système, quelques constructeurs ont fait usage d'écharpes en bois ou en fer (fig. 61), disposées en sens inverse des bracons, et boulonnées sur les

traverses. Ce moyen n'est efficace que lorsque l'écharpe en fer s'assemble à la tête du poteau-tourillon; les écharpes en bois sont plutôt nuisibles qu'utiles à la solidité du système.

La méthode employée généralement aujourd'hui consiste à remplacer les écharpes et les bracons par un tirant en fer allant du haut du poteau-tourillon au bas du poteau busqué. Un moufle à coins, que porte ce tirant, permet de le raccourcir, de relever le poteau-busqué, et d'éviter les affaissements de la partie antérieure du vantail. Ce tirant donne la possibilité de placer verticalement les madriers du bordage.

L'emploi de roulettes prévient tout abaissement de la porte, et procure une grande sécurité pour l'exécution de la manœuvre. Cependant, il présente des inconvénients nombreux, qui le font rejeter autant que possible, et dont les principaux résultent des frottements et du faible diamètre qu'on est forcé de donner à la roulette et à son axe.

Aussi, plusieurs constructeurs n'ont-ils placé dans leurs portes que des roulettes *d'attente,* fixées de façon à ne toucher le radier que dans le cas où les portes donneraient du nez. Ce dispositif a été appliqué aux écluses des anciens bassins d'Anvers, à celles de Dunkerque, etc.

Généralement, on donne la même épaisseur, perpendiculairement au plan du vantail, aux quatre pièces extrêmes qui en forment le châssis. On y pratique des feuillures du côté d'amont, pour recevoir le bout des bordages qui s'appliquent sur les entretoises intermédiaires, lesquelles ont, par conséquent, moins d'épaisseur contre la poussée de l'eau. Quant à l'espacement de ces dernières, c'est un point sur lequel on n'est pas encore franchement arrêté. La solidarité du système augmente évidemment avec le nombre des entretoises, mais il y a inconvénient à les multiplier parce qu'on augmente le poids de la porte et on affaiblit le poteau-tourillon; reste donc alors à augmenter leur équarrissage.

Si l'on ne considère que la pression statique de l'eau, on est conduit rationnellement à proportionner la résistance des parties de la charpente à la charge qui les presse. D'après cette hypothèse, lorsqu'on veut donner aux entretoises un même équarrissage, il faut les rapprocher dans le bas de la porte; si c'est l'espacement qui doit rester constant, il faut faire croître leur équarrissage à partir du haut.

Pour évaluer la pression que supporte une entretoise, nous suppo-

serons le bordage divisé en panneaux rectangulaires se joignant sur les axes horizontaux des entretoises; chacune de ces dernières peut donc être considérée comme recevant une partie de la pression que supportent les deux panneaux qui viennent s'appuyer contre elle.

Admettons d'abord que l'espacement des entretoises soit variable et déterminé; leur équarrissage devra donc varier d'après leur profondeur au-dessous du niveau de l'eau, celle-ci étant censée agir sur une seule face de la porte.

Représentons par :

D la pression normale totale exercée contre le bordage entier, poteaux compris;

$h$ la hauteur de la porte, depuis le niveau de l'eau;

$b$ la largeur de id. id.;

$D_1$ la pression normale exercée sur le panneau supérieur;

$u$ la hauteur du panneau supérieur mesurée à partir du niveau de l'eau;

$D_2$ la pression normale sur le deuxième panneau;

$v$ la hauteur du deuxième panneau, ou distance entre les axes des deux entretoises supérieures;

Ainsi de suite pour $D_3$, $D_4$..... et $w$, $x$,..... etc.

Soit aussi :

$P_1$ la pression normale sur la 1re entretoise supérieure;

$P_2$ id. sur la 2e entretoise:

$P_3$, $P_4$, etc., les pressions normales sur les entretoises suivantes.

Si, comme nous le supposons, la porte n'est pressée que sur une seule face, nous poserons :

$$D = 1000^k \frac{bh^2}{2} = 500^k\, bh^2$$

Lorsqu'il y a pression des deux côtés, en aval et en amont, la relation devient :

$$D = 500^k b\,(h^2 - h'^2)$$

Dans ce dernier cas, la pression ne se répartit pas uniformément sur toute la surface de la porte, mais elle augmente à partir du niveau

d'eau d'amont jusqu'à celui d'aval; depuis ce dernier jusqu'au bas, elle reste constante et égale à $1000^k (h - h')$ par mètre carré.

L'on aura successivement, dans la première hypothèse :

$$D_1 = 500\, bu^2 = 500\, bh^2 \frac{u^2}{h^2} = D \frac{u^2}{h^2}$$

$$D_2 = \frac{v(2u + v)}{h^2} D$$

$$D_3 = \frac{w\{2(u + v) + w\}}{h^2} D$$

$$D_4 = \frac{x\{2(u + v + w) + x\}}{h^2} D$$

La connaissance de ces pressions partielles permettra de déterminer celles que supportent les entretoises, d'après cette considération que les pressions des panneaux agissent sur elles en raison inverse de la distance qui sépare l'axe de chaque entretoise des centres de pression des panneaux adjacents. Nous supposerons que l'axe de l'entretoise supérieure soit au niveau de l'eau.

Or, pour un rectangle dont les horizontales supérieure et inférieure sont situées à des distances $z$ et $z'$ de la surface liquide, la distance du centre de pression sur ce rectangle à cette surface est donnée par l'expression :

$$\frac{2}{3} \frac{z^2 + zz' + z'^2}{z + z'}$$

D'après cela, les distances respectives des centres de pression au niveau de l'eau seront pour les panneaux considérés :

1er panneau $\frac{2}{3} u = d$

2e panneau $\frac{2}{3} \frac{(u + v)^2 + u(u + v) + v^2}{u + (u + v)} = \frac{2}{3} \frac{3u^2 + 3uv + v^2}{2u + v} = d_1$

3e panneau $\frac{2}{3} \frac{3(u + v)^2 + 3(u + v)w + w^2}{2(u + v) + w} = d_2$

4e panneau $\frac{2}{3} \frac{3(u + v + w)^2 + 3(u + v + w).x + x^2}{2(u + v + w) + x} = d_3$

Ainsi, la pression $D_1$ s'exerce sur le premier panneau en un point

situé à une distance $d = \frac{2}{3} u$ du niveau de l'eau, ou bien à une distance égale à $\frac{2}{3} u$ de l'axe horizontal de l'entretoise supérieure. Par conséquent, cette pression, sur cet axe, n'est plus que $\frac{1}{3} D_1$ tandis que la pression restante, due au premier panneau, c'est-à-dire $\frac{2}{3} D_1$ se reporte sur l'axe de la deuxième entretoise. Mais celle-ci supporte en outre une partie de la pression du deuxième panneau, partie représentée par $D_2 \frac{v + u - d_1}{v}$ ; l'on aura donc :

$$P_1 = \frac{D}{3h^2} u^2 \quad \text{.....} \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{2}{3} \frac{D}{h^2} u^2 + D \frac{v(2u+v)}{h^2} \times \frac{v+u-d_1}{v} = \frac{D}{3h^2} \left\{ 2u^2 + v(3u+v) \right\} \text{.....} (2)$$

On trouverait de la même manière :

$$P_3 = \frac{D}{3h^2} \left\{ v(3u + 2v) + w \left[ 3(u+v) + w \right] \right\} \quad \text{.....} \quad (3)$$

$$P_4 = \frac{D}{3h^2} \left\{ w \left[ 3(u+v) + 2w \right] + x \left[ 3(u+v+w) + x \right] \right\} \quad \text{.....} \quad (4)$$

Pour l'entretoise inférieure, qui ne supporte que la partie de pression due au dernier panneau, le deuxième terme du second membre sera nul. Dans le cas d'une porte à 5 entretoises, dont 3 intermédiaires, la valeur de la pression normale exercée sur l'entretoise inférieure sera :

$$P_5 = \frac{D}{3h^2} \left\{ x \left[ 3(u+v+w) + 2x \right] \right\} \quad \text{.....} \quad (5)$$

Supposons maintenant que les entretoises soient également espacées ; on aura : $u = v = w = x$, et par suite :

$$D_1 = \frac{u^2}{h^2} D \qquad \text{et} \qquad P_1 = \frac{D}{3h^2} u^2$$

$$D_2 = \frac{3u^2}{h^2} D \qquad P_2 = \frac{D}{3h^2} 6u^2$$

$$D_3 = \frac{5u^2}{h^2} D \qquad P_3 = \frac{D}{3h^2} 12u^2$$

$$D_4 = \frac{7u^2}{h^2} D \qquad P_4 = \frac{D}{3h^2} 18u^2$$

dont la dernière, pour cinq entretoises, est :

$$P_5 = \frac{D}{3\,h^2}\,11\,u^2$$

Dans ce dernier cas, on peut encore poser : $u = v = w = x = \frac{1}{4}h$; d'où :

$$D_1 = \frac{1}{16}D \quad \text{et} \quad P_1 = \frac{1}{3}D \times \frac{1}{16}$$

$$D_2 = \frac{3}{16}D \qquad P_2 = \frac{1}{3}D \times \frac{6}{16},$$

$$D_3 = \frac{5}{16}D \qquad P_3 = \frac{1}{3}D \times \frac{12}{16}$$

$$D_4 = \frac{7}{16}D \qquad P_4 = \frac{1}{3}D \times \frac{18}{16}$$

$$P_5 = \frac{1}{3}D \times \frac{11}{16}$$

Il reste à déterminer l'équarrissage des entretoises, d'après la méthode employée pour les solives encastrées à leurs extrémités et chargées d'un poids uniformément réparti. A cet effet, on se donne l'épaisseur des pièces, puis on cherche leur largeur au moyen des valeurs de $P_1$ $P_2$ $P_3$ ..., etc., qui leur correspondent.

D'après Minard, cette disposition des entretoises également espacées est la meilleure, et il conseille de leur donner le même équarrissage, en adoptant celui qui convient à l'entretoise la plus chargée. A l'appui de cette conclusion, il fait valoir les considérations suivantes.

1° Les parties supérieures des portes ont à résister non-seulement à la simple pression de l'eau, mais aux chocs des petites vagues, et accidentellement à ceux des bâtiments. En outre, comme elles sont plus exposées aux alternatives de sécheresse et d'humidité, leur détérioration arrive plus rapidement que celle des parties inférieures.

2° Les entretoises à mi-hauteur sont plus affaiblies que les autres par les entailles des bracons qui les rencontrent près de leur milieu.

D'après la théorie et l'expérience, si un madrier, appuyé par ses extrémités et son milieu sur trois points de niveau, est chargé uniformément, l'appui du milieu porte les deux tiers de la charge totale,

et les cinq huitièmes si la charge croît comme la pression de l'eau sur une porte d'écluse.

D'un autre côté, si l'on charge un madrier, appuyé par ses extrémités seulement, avec des poids croissant comme la pression de l'eau, la plus grande flexion se produit, d'après Minard, aux cinq douzièmes de la longueur.

On peut donc conclure de ces résultats d'expérience, que, si les bordages sont verticaux, la flexion maxima tend à avoir lieu sur une ligne horizontale située aux cinq douzièmes de la hauteur, et correspondant, à peu près, à l'entretoise-milieu.

Le même résultat se présente quand les madriers du bordage sont parallèles au bracon. Dans ce cas, le lieu de la plus grande flexion qu'ils tendent à prendre forme une courbe passant un peu au-dessous de la diagonale qui va du pied du poteau busqué à la tête du poteau-tourillon. Cette courbe coupant l'entretoise à mi-hauteur vers son milieu, celle-ci sera encore plus exposée que les autres entretoises, qui ne sont rencontrées par la courbe que vers leurs extrémités.

3° Différents motifs, moins importants que les précédents, rendent les portes plus faibles dans le haut que dans les parties inférieures. Ainsi, c'est dans le haut que les assemblages sont fatigués par la manœuvre, ou par le poids de la porte si elle n'a pas de roulette; c'est là aussi que les réactions sont les plus fortes, lorsqu'on ferme la porte contre la marée, etc.

4° Enfin, ce qui est plus concluant que tous les raisonnements qui précèdent, l'expérience prouve que, généralement, on a trop fortifié la partie inférieure des portes, lorsqu'on y a rapproché les entretoises, attendu que, dans ce cas, ce n'est jamais le bas qui plie; la pression maxima se présente alors à l'entretoise située un peu au-dessus du milieu. Aussi, pour consolider cette partie faible, on place souvent à mi-hauteur une entretoise de même épaisseur horizontale que les entretoises extrêmes. Le bordage, interrompu en cet endroit, est cloué dans des feuillures ménagées sur cette entretoise-milieu.

Contrairement aux conclusions de Minard, quelques constructeurs préfèrent espacer les entretoises de manière à les soumettre toutes à d'égales pressions. Les dimensions des pièces restent constantes, et l'égalité de pression s'obtient par un espacement convenable.

Pour satisfaire à cette condition, sans avoir recours à de longs calculs, on pourra employer la méthode graphique suivante qui détermine, d'une manière très-simple, la position des axes horizontaux des entretoises.

Soit AB (fig. 62) la hauteur de la porte, censée noyée sur une face. Supposons que le niveau de l'eau affleure le point A. La pression totale D, ou $\frac{bh^2}{2} \times 1000^k$, peut être représentée par la surface du triangle ABC, dans lequel AB = BC. Cette surface est proportionnelle à la pression sur les points les plus bas, et la pression totale sur chaque unité de largeur de porte est égale à $h \times \frac{h}{2} = \frac{h^2}{2}$.

La pression moyenne qui s'exerce sur tous les points de la porte est égale à :

$$\frac{D}{bh} = 1{,}000^k \frac{h}{2}$$

et c'est à cette pression moyenne que doit pouvoir résister l'ensemble des entretoises.

On aura la position de chaque entretoise en divisant la surface du triangle ABC en autant de parties équivalentes qu'il y a d'entretoises, par les droites *ab, cd, ef,* parallèles à la base, et en plaçant les entretoises à la hauteur du centre de gravité des trapèzes et du triangle supérieur formés par ces parallèles.

Désignant par $h_1$ $h_2$ $h_3$ les longueurs A*a*, A*c*, A*e*, et par *n* le nombre des entretoises, ou des divisions de AB, on aura respectivement :

$$h_1^2 = h^2 \frac{n-2}{n-1}$$

$$h_2^2 = h^2 \frac{n-3}{n-1}$$

$$h_3^2 = h^2 \frac{n-4}{n-1}$$

La surface de chacun des trapèzes et du triangle représentera la pression que supporte chacune des entretoises.

La division du triangle ABC en parties d'égale surface, et la déter-

mination des centres de gravité de ces parties, peuvent se faire graphiquement de la manière suivante.

1° La ligne AB étant divisée en autant de parties égales qu'il doit y avoir d'entretoises, on tracera une demi-circonférence sur AB comme diamètre (fig. 63).

2° Ayant mené les perpendiculaires $ma_1$, $na_2$, $pa_3$, on rabattra ces points $a_1$, $a_2$, $a_3$, sur AB, en prenant le point A comme centre, et l'on mènera les perpendiculaires $b_1 c_1$, $b_2 c_2$, $b_3 c_3$, qui divisent la surface ABC en parties équivalentes.

3° Tous les centres de gravité se trouveront sur la ligne AE, menée par le milieu de BC.

4° On prolongera alors à droite et à gauche les lignes $b_1 c_1$, $b_2 c_2$, $b_3 c_3$; puis, ayant tiré la perpendiculaire A$d$, on fera :

$$Ad = b_1c_1 \qquad e_2c_2 = b_1c_1$$
$$b_1d_1 = b_2c_2 \qquad e_3c_3 = b_2c_2$$
$$b_2d_2 = b_3c_3$$

5° Enfin, tirant les lignes $c_1\, d$, $e_2\, d_1$, $e_3\, d_2$, etc., l'on obtiendra sur AE les points $f_1$, $f_2$, $f_3$, qui sont les centres de gravité cherchés; il suffira de projeter ces points sur AB pour avoir la position des entretoises.

Dans la pratique, comme on est obligé de placer une entretoise au-dessus et au-dessous de la porte, on s'écarte un peu des positions déterminées par la théorie précédente.

Si les entretoises étaient également espacées, on pourrait, sans erreur sensible, représenter la pression que supporte chacune d'elles par la demi-somme des surfaces des trapèzes inférieur et supérieur qui lui sont adjacents; cette demi-somme représentant, bien entendu, la pression par unité de longueur d'entretoise.

Les considérations que nous avons émises relativement à la pression dans le haut des portes et aux dimensions de l'entretoise supérieure ne s'appliquent pas évidemment aux écluses qui peuvent recevoir un linteau supérieur en bois, contre lequel la traverse supérieure vient buter. Nous en verrons un exemple dans les applications militaires.

L'entretoise supérieure se place à $0^m20$ environ au-dessus des

hautes mers de vives eaux, et l'entretoise inférieure à 0m10 au-dessus du radier.

On tient les poteaux à 0m05 ou 0m06 du radier, afin qu'ils ne frottent pas dans leurs mouvements; on les élève à 0m25 ou 0m30 au-dessus de l'eau, quand la porte est manœuvrée par une crémaillère circulaire ; ils s'élèvent davantage et dépassent les bajoyers quand la manœuvre s'opère à l'aide d'un grand levier qui réunit le haut des poteaux, et fait en partie équilibre au poids de la porte.

Par suite des difficultés qu'on rencontre pour se procurer les fortes pièces de bois nécessaires aux écluses des grands ports militaires, on emploie des entretoises qui ont moins d'équarrissage (environ 0m05) vers le poteau busqué. Cette disposition, fort usitée aujourd'hui, est avantageuse sous plusieurs rapports; ainsi, elle satisfait aux conditions de résistance et de légèreté, tout en permettant de débiter des pièces plus solides par un sciage de droit fil.

Les assemblages des entretoises avec les poteaux se font à tenon et mortaise. La traverse inférieure n'a qu'un demi-tenon, et il en serait de même des autres entretoises si elles étaient très-rapprochées, afin de ne pas affamer outre mesure le pied des poteaux. Souvent les traverses extrêmes ont des tenons doubles.

On ne fait pas d'embrèvement dans la charpente des portes de canaux, mais on en fait généralement à tous les assemblages des grandes portes de mer.

Les tenons simples doivent avoir du quart au tiers de l'épaisseur des pièces qui les portent, et une longueur égale à la moitié de la largeur de ces dernières.

Afin de conserver au grand bracon toute sa solidité, on entaille les entretoises de 0m03 environ à sa rencontre. On le place en amont parce que les entretoises seraient trop affaiblies si l'entaille était faite en aval.

Les bordages ont de 0m08 à 0m12 d'épaisseur pour les plus grandes portes ; dans les plus petites, on ne peut guère donner moins de 0m05, sinon le calfatage ne tiendrait pas.

La disposition verticale des bordages est très-favorable à la force de la porte, surtout lorsqu'elle est fermée, parce que les madriers s'appuient ainsi sur la traverse supérieure qui est la plus résistante, tant

à cause de son équarrissage que par la faible pression d'eau qu'elle subit. Il faut alors diviser le bracon en autant de pièces qu'il y a d'intervalles d'entretoises.

Tous les assemblages doivent être remplis de goudron au moment du levage, et tous les joints extérieurs calfatés à deux étoupes et brayés.

Les assemblages sont fortifiés par des ferrures méplates, ayant 0m10 à 0m12 de largeur, sur 0m015 à 0m03 d'épaisseur, pour les grandes portes, et 0m07 sur 0m01 pour les petites.

Les étriers s'emploient de préférence aux équerres ; ils sont indispensables au poteau-tourillon, pour l'empêcher de se fendre par la torsion qu'il éprouve dans la manœuvre.

Les ferrures plates, à l'exception des écharpes, sont encastrées dans le bois et l'affleurent. L'entaille de la pièce est couverte, à leur jonction, par du papier épais, du feutre, de la mousse ou de la toile goudronnée. Les têtes des boulons sont entourées de filasse graissée avec du suif, avant qu'ils soient chassés dans leur logement à coups de masse. Leur diamètre varie de 0m025 à 0m035.

Le système de rotation du poteau-tourillon se compose d'un pivot avec crapaudine placé au pied, et d'un collier, entier ou partiel, qui maintient la tête du poteau dans l'axe vertical passant par le centre du pivot inférieur.

Dans toutes les anciennes portes, la crapaudine était scellée dans le radier, et le pivot fixé au poteau-tourillon (fig. 64). La disposition inverse (fig. 65) fut proposée en 1772, et appliquée, pour la première fois, trente ans après, au canal de Saint-Quentin ; elle est généralement adoptée aujourd'hui, quoique, d'après Minard, il n'y ait guère à craindre d'inconvénients par l'autre méthode.

Les pivots et crapaudines se font en bronze, rarement en fonte. On leur donne extérieurement une forme hexagonale ou pentagonale, et on y ajoute deux ou trois taquets intérieurs, de 0m03 ; quelquefois on adopte la forme circulaire avec parties saillantes.

Lorsque la crapaudine a été fixée au poteau, on a dû réduire le diamètre du pivot, afin de conserver assez de bois autour de l'extérieur de la crapaudine, qui garnit tout le pied du poteau-tourillon et se relève même pour l'envelopper et lui servir de frette. Ce diamètre est alors de 0m10 à 0m11, et la saillie d'environ 0m07.

Les colliers sont composés, généralement, de deux parties demi-circulaires réunies par des charnières La partie qui est du côté du bajoyer y est fixée par deux tirants ou ancres (fig. 66).

Quand les portes sont munies de roulettes, les colliers ne servent qu'à empêcher la tête du poteau de vaciller. Dans le cas contraire, ils supportent une traction horizontale considérable, puisqu'ils empêchent seuls la chute des portes sur le radier.

Le diamètre intérieur du collier doit être égal à celui du poteau-tourillon, c'est-à-dire, à l'épaisseur de la porte, afin qu'on puisse lever verticalement le vantail au-dessus de la crapaudine, et en dégager le pivot, quand on veut réparer ou renouveler une porte; c'est là aussi le but des charnières. Si le diamètre du collier est de 0m03 à 0m04 plus petit, cela force à diminuer d'autant le diamètre du tourillon au-dessous de l'emplacement du collier, afin que celui-ci n'arrête pas l'exhaussement de la porte.

Les dimensions qu'on donne aux colliers, tant dans la partie étroite que dans la charnière, sont plus fortes que celles qui correspondent à une simple résistance à la traction, afin que ces pièces résistent aux chocs éventuels des navires. Pour ce motif aussi, il est bon de les tenir un peu en arrière des bajoyers. Afin de bien les centrer avec la crapaudine où le pivot du radier, il faut les remplir d'un cercle en bois, du centre duquel on fait tomber un fil à plomb, qui reste suspendu pendant tout le temps de la pose du collier et des scellements des ancres.

Les colliers ont autant de branches qu'il y a d'ancres ou tirants. Ces branches sont terminées par une tête avec deux adents de chaque côté; quelquefois, il y a encore deux autres adents plus éloignés (fig. 66). D'ordinaire, ce sont les branches du collier qui embrassent les ancres exactement; on coule du plomb entre eux pour augmenter le contact

Les ancres, ou tirants, ont plusieurs mètres de longueur dans les grandes écluses, et sont traversées par des goujons scellés dans la maçonnerie ou sur le couronnement.

Lorsqu'on n'emploie qu'un demi-collier, son diamètre intérieur doit être celui du poteau-tourillon, qui s'appuie par-derrière contre le chardonnet.

Les colliers se font en bronze, fer ou fonte. Les ancres sont toujours en fer forgé.

Afin de diminuer le frottement et de prévenir la torsion de la tête du poteau-tourillon, on frette celle-ci au moyen d'un collet en bronze (fig. 58), de section circulaire avec taquets intérieurs. Cette disposition n'est plus applicable lorsque le collier se trouve au-dessous du niveau de l'entretoise supérieure, comme cela se présente fréquemment; il faut alors composer le collet de plusieurs pièces.

Le poteau-tourillon est arrondi sur les trois faces qui correspondent au chardonnet. Comme il se produirait néanmoins une résistance considérable par le frottement de cette partie arrondie du bois contre la pierre, on donne au pivot du poteau une excentricité de quelques centimètres par rapport au centre de l'arrondissement de la pierre de chardonnet ; de cette façon, il n'y a contact entre les deux arrondissements que lorsque la porte est complétement ouverte ou fermée; entre ces deux positions extrêmes, la courbe du poteau s'écarte ou se rapproche progressivement de celle de la pierre.

Soit $v$ (fig. 67) le centre de l'arrondissement $nm''$ du chardonnet; $m''m'd'$ le parement du busc, et $nd$ celui de l'enclave de la porte; ce centre $v$ s'obtient par l'intersection des axes $bvz$ et $a'vv'z'$ de la porte dans ses positions extrêmes.

Quand la porte est ouverte, elle s'applique contre le parement $nd$, et les arrondissements du poteau et de la pierre coïncident suivant $nm''$. Si la rotation s'opérait autour du centre $v$, la partie $m''xm$ du poteau viendrait s'appliquer en $m''n$ lorsque le vantail buterait contre le busc $m''m'd'$, et dans ce mouvement il se produirait un frottement continu, qu'il s'agit d'éviter.

A cet effet, représentons par L l'épaisseur de la porte ou le diamètre du poteau-tourillon :

$$L = ce = c'e'$$

Prenons $ab = a'b' = \frac{1}{10}$ L, et menons $b'Oy'$ et $aOy$ parallèlement aux axes précités; nous obtiendrons un point O, que nous prendrons pour centre de rotation de la porte. Le cercle tracé de O comme centre, avec un rayon égal à $\frac{L}{2}$ moins la longueur $vO$, déterminera l'exté-

rieur du collet en bronze, ou l'intérieur du collier en fer à charnières. Ce cercle sera tangent à celui du poteau-tourillon en un point $x$, qui se trouve sur $vO$ prolongé; ce résultat géométrique est évident.

Il suit de là que, dans la rotation autour du point O, le centre $v$ du poteau décrit l'arc $vv'$, et que le demi-cercle $mxm''n$ vient en $m'x'n'$.

Les poteaux busqués se délardent, de façon que le plan de joint par lequel ils se touchent divise en deux parties égales l'angle du busc. Il est prudent de ne pas prolonger ce délardement au delà du tiers ou de la moitié de l'épaisseur; on laisse ainsi plus de force aux poteaux, et la jonction est plus intime.

Les roulettes ont de $0^m20$ à $0^m40$ de diamètre; celui de leurs axes varie de $0^m05$ à $0^m08$. L'axe doit être fixé à la roulette. Il tourne dans des chapes boulonnées à la traverse inférieure, ou bien, à un potelet vertical appliqué contre l'amont des entretoises; quelquefois aussi, on a découpé la traverse inférieure, afin de pouvoir augmenter les diamètres des roulettes et de leurs axes. Des bandes circulaires, en bronze ou en fonte, sont scellées au plomb dans le radier, et le garantissent de l'effet des pressions considérables exercées par la petite surface des roulettes.

*Portes courbes.* — Suivant *Bélidor*, les portes droites seraient plus résistantes que les portes courbes, toutes choses égales d'ailleurs. Cette conclusion est évidemment inexacte; en effet, à égalité de charge, une pièce de bois, encastrée par ses extrémités, prendra une flexion bien plus forte si elle est droite que lorsqu'elle possède une légère courbure, la flèche ne fût-elle que d'un trentième. D'un autre côté, si, dans les portes droites la flexion tend à rompre les joints d'amont et les assemblages, elle produit un résultat inverse dans les portes courbes, puisqu'elle a pour effet de resserrer ces derniers.

Aussi, l'emploi des portes courbes est-il très-fréquent aujourd'hui; on n'en fait guère d'autres, en Angleterre, pour les écluses à grande section.

La flèche de courbure varie entre 1/20 et 1/40 de la longueur du vantail; il est préférable cependant de prendre 1/30 pour limite inférieure.

L'équarrissage du châssis est d'environ $0^m50$ pour des écluses de

18 mètres de passage. Le nombre des entretoises est de 9 à 10 pour 7 à 10 mètres de hauteur.

Les bordages sont toujours verticaux, soit qu'ils recouvrent toutes les entretoises, soit qu'ils n'aillent que d'une entretoise à une autre. Il en résulte que, pressés comme des voussoirs, ils supportent à eux seuls une partie de la charge ; les entretoises en sont soulagées et la porte devient plus étanche.

Ces portes ont souvent un bracon ; toujours elles sont munies de roulettes placées très-près, ou même au-dessous du poteau busqué.

On fait aussi des portes dont les entretoises sont composées de deux pièces; l'une, placée en amont, est courbe et agit comme voussoir; l'autre, en aval, est formée d'une partie droite faisant l'office de tirant. Ces deux pièces sont assemblées par adents et boulonnées. Ce système a été employé pour les grandes portes des écluses de Cherbourg, dont chaque vantail a environ 10 mètres de largeur sur 11 mètres de hauteur. Elles ont 14 entretoises jointives dans le bas des vantaux, et 6 autres separées. L'épaisseur au milieu est de $0^m85$, et de $0^m55$ aux extrémités ; la flèche est donc de $0^m30$, ou à peu près $\frac{1}{35}$.

Quelquefois les entretoises sont d'une seule pièce, courbe vers l'amont et droite en aval. Telles sont certaines portes d'écluse de Dunkerque, Liverpool, etc.

On a proposé aussi d'employer des entretroises courbées et armées suivant le système de M. *Laves*.

Toutes ces méthodes ont spécialement pour but d'obtenir une grande résistance avec des pièces d'un équarrissage relativement moindre que celui des portes ordinaires.

*Portes mixtes ou métalliques.* Parmi les combinaisons du bois avec le fer, nous citerons celle qui a été employée au canal de Saint-Quentin. Elles sont composées d'un châssis, avec croix de Saint-André en fer forgé de $0^m06$ sur $0^m08$ d'équarrissage. Celle-ci est incrustée entre deux plans de madriers jointifs, horizontaux en amont et verticaux en aval, qui sont serrés par de petits écrous avec les pièces en fer.

D'après Minard (1) qui a fait renouveler une de ces portes, elles durent autant que celles en bois. Leur prix d'établissement est le dou-

(1) M. Minard. *Cours de construction.*

ble de celui des portes ordinaires, et leur entretien est le même. Quant au renouvellement, il coûte évidemment moins puisqu'on peut utiliser les ferrures.

Les Anglais, qui ont la fonte à bas prix, ont fait des portes d'écluses de mer avec des entretoises en fonte recouvertes de madriers. Les premiers aussi, ils ont construit des portes tout à fait en fonte au canal de Chester. Cet exemple a été suivi au canal de Berry, où les vantaux sont de deux pièces; puis au canal de Saint-Denis, où ils sont formés de 4 panneaux assemblés les uns sur les autres par des rebords boulonnés.

On a fait aussi des portes en fonte et en tôle, qui ne diffèrent des portes mixtes anglaises que par la tôle de fer, de 0m003 d'épaisseur, substituée aux madriers de recouvrement. Leur prix est double de celui des portes en bois.

L'expérience ne s'est pas encore entièrement prononcée sur le mérite absolu des systèmes précédents. A l'égard de la fonte, on peut cependant faire les observations suivantes : 1° elle présente de fréquents dangers de rupture, soit par le choc, soit par la pression; 2° immergée dans l'eau de mer, et en contact avec des boulons en fer forgé, elle se corrode assez rapidement; 3° les défauts et le changement d'état de ce métal ne pouvant généralement être bien appréciés, la rupture peut se produire au moment où l'on s'y attend le moins.

*Portes superposées.* On a exécuté en 1807 à Flessingue un système de portes qui a été imité ensuite à Anvers, à Beaucaire, etc., et qui permet d'employer les portes busquées à la fermeture des grandes écluses de mer.

Ce système comprend deux paires de portes superposées, et disposées de façon que la traverse supérieure de chaque porte basse serve de busc ou heurtoir à l'entretoise inférieure de la porte haute correspondante (fig. 61.)

Afin de diminuer les équarrissages dans la partie la plus comprimée par l'eau, on donne aux portes du bas une largeur moindre qu'aux retenues supérieures. Le passage se trouve ainsi divisé en deux rectangles inégaux; mais cette forme s'applique heureusement aux gabarits des navires et des bateaux à vapeur.

*Manœuvre des portes.* Pour manœuvrer les portes busquées, l'on emploie l'un des moyens suivants.

1° Les flèches ou balanciers, qui ne sont que le prolongement des traverses supérieures sur les bajoyers.

Ce système ne convient qu'aux petites écluses.

2° Des cordages attachés à des organeaux boulonnés sur la partie supérieure du poteau busqué. Il faut des cordages en amont et en aval et quatre cabestans.

3° Avec un cordage fixé aux deux bouts d'une bielle en faisant deux ou trois tours sur un cabestan. La bielle devant glisser sur la plate-forme de l'écluse, il faut prendre la porte par la tête du poteau busqué.

Ce moyen présente sur le précédent l'avantage de n'exiger qu'un cabestan pour ouvrir et fermer le vantail.

4° Avec le même système, dans lequel la corde est remplacée par une crémaillère en fonte (fig. 68) ou en fer forgé, encastrée et boulonnée dans la bielle. Une lanterne engrenant dans la crémaillère est placée au pied du cabestan.

L'on emploie fréquemment ce genre de manœuvre lorsque les dimensions des portes ne sont pas grandes. Il est appliqué aux écluses des bassins d'Anvers.

5° Avec des chaînes, saisissant les vantaux à la traverse inférieure, et s'enroulant sur des tambours métalliques logés dans le massif des bajoyers. Les axes de ces tambours, prolongés jusqu'au-dessus du couronnement de l'écluse, sont manœuvrés comme des cabestans.

6° Par un arc denté, en fonte, fixé normalement au vantail, et mû par un pignon à axe vertical, établi sur la tablette du bajoyer.

7° Par un arc en fonte, denté du côté du centre, fixé au radier, et engrenant avec un pignon dont l'axe vertical, placé du côté du poteau busqué, est mû en haut par l'éclusier, qui se meut lui-même avec la porte.

Les balanciers employés fréquemment dans les écluses à petite section, sont simples, soulagent les colliers et en diminuent le frottement; mais ils fatiguent les assemblages supérieurs.

Les autres systèmes n'ont pas ce dernier inconvénient lorsqu'on applique la manœuvre dans le bas ou le milieu du vantail. Ils procurent l'avantage d'ouvrir les portes malgré une légère différence de niveau entre les biefs, ce qui est très-important dans les écluses à sas.

# CHAPITRE DOUZIÈME.

## ÉCLUSES DE CHASSE.

---

### DESCRIPTION GÉNÉRALE.

Les écluses de chasse sont des pertuis plus ou moins grands, munis de vannes, ou de portes disposées de façon à s'ouvrir rapidement, et à lâcher tout d'un coup, au moment de la basse mer, les eaux de la haute mer amassées, au préalable, dans un *bassin de retenue*. On obtient ainsi un courant, qui entraîne et qui chasse au large les atterrissements formés dans le chenal et l'avant-port.

L'efficacité des chasses dépend de la violence du courant, et, par conséquent, de la masse d'eau qui passe en un temps donné par le pertuis. L'économie et la difficulté d'établissement sont donc les seuls motifs qui peuvent s'opposer à ce qu'on donne au débouché la plus grande section possible. D'un autre côté, il existe dans chaque cas particulier, un minimum d'ouverture en dessous duquel les chasses n'auraient plus une énergie suffisante; ce minimum de réduction est déterminé en outre par la condition, que le débouché doit être tel que le remplissage complet du bassin de retenue puisse se faire pendant la durée d'une marée montante. Cette deuxième condition n'est pas réalisée dans quelques ports de mer, entre autres Boulogne et Ostende.

Afin d'augmenter le volume d'eau de la chasse sans avoir recours à une section exagérée, on compose d'ordinaire ces écluses de plusieurs pertuis accolés et séparés par des piles en maçonnerie.

Les fondations de ces ouvrages, et spécialement de leurs radiers,

exigent des précautions particulières, à cause des remous et des courants violents qui se produisent autour d'eux, et qui tendent à former des affouillements à des distances plus ou moins grandes de l'écluse. C'est ainsi qu'à Ostende, dans un terrain de sable serré un peu vaseux, il s'est formé, à 60 mètres en aval de l'écluse militaire, un affouillement de 7m50 de profondeur au-dessous du radier.

Ces constructions doivent donc être pourvues d'avant-radiers, en maçonnerie très-solide et très-dure, de garde-radiers descendant à quelques décimètres au-dessous des affouillements probables, et de faux-radiers en béton ou en fascinages lestés de grosses pierres.

Les affouillements dépendent de la hauteur de la chute et de la nature du terrain attaqué. On ne peut indiquer aucune règle pour déterminer les dimensions des radiers et avant-radiers des écluses de chasse. D'après Minard (1), on ne peut guère leur donner moins de 2m00 d'épaisseur, ni moins de 20 à 30 mètres de longueur aux faux-radiers.

Dans un grand nombre d'anciennes écluses, à Tréport entre autres, les faux-radiers ont été formés de pilots et grillages remplis de glaise et recouverts de planchers. Mais la glaise, dans ces conditions, doit être fréquemment renouvelée, et elle ne tient plus dès que les planchers sont un peu détériorés. Le béton hydraulique est d'un emploi plus avantageux, dans des circonstances analogues ; il est nécessaire, alors, de supprimer les grillages et les pilots, en ne conservant de ces derniers que ceux qui portent les traversines servant à fixer les madriers placés dans le sens du courant. On conservera aussi les files de palplanches ou de pilots jointifs qui défendent la tête d'aval ou qui forment coffrage en travers de l'axe du passage.

On emploie, pour la fermeture des écluses de chasse, les systèmes suivants : 1° les vannes à coulisses ; 2° les portes tournantes simples ; 3° les portes tournantes couplées ; 4° les portes busquées avec vantail de chasse ; 5° les portes tournantes en éventail.

## VANNES A COULISSES.

Les vannes à coulisses ne sont plus employées aujourd'hui que dans les aqueducs latéraux des écluses, ou comme moyens accessoires.

(1) Minard, *Cours de construction*.

Leur défaut principal est d'être d'une manœuvre lente et pénible, par suite de la résistance engendrée par le frottement. Cette résistance étant, d'après Gauthey, égale à 1/6 du poids de la vanne, sa valeur croît rapidement avec les dimensions de cette dernière. Elles offrent, en outre, le grave inconvénient de restreindre l'effet que la retenue et les orifices pourraient procurer; ce fait résulte de ce que, par la lenteur de la manœuvre, les tranches supérieures de la charge d'eau sont écoulées avant que les vannes soient entièrement levées.

## PORTES TOURNANTES SIMPLES.

On désigne sous le nom de porte tournante, un vantail vertical composé à peu près comme les vantaux des portes busquées, mais dont la rotation a lieu sur un poteau-tourillon placé à une certaine distance de la verticale passant par le centre de gravité de la porte. Celle-ci est divisée ainsi en deux parties de surface inégale, qui viennent battre dans des feuillures disposées dans des obstacles mobiles; de sorte que la seule pression de l'eau suffit pour ouvrir spontanément la porte quand on a retiré l'obstacle contre lequel s'appuie le plus grand côté. D'autres fois, on ne ménage qu'une faible inégalité entre les deux ailes, et on place, dans la plus grande des deux parties du vantail, une vantelle qui ferme ou démasque à volonté un orifice tel, qu'en le déduisant de la surface de cette portion, ce qui reste de cette dernière soit moindre que la surface de l'aile la plus petite.

Dans certaines portes tournantes simples, comme celles de Dieppe, du Havre, etc., on a adopté, pour appui mobile du grand côté, un système composé de deux poteaux verticaux *a* et *b* (fig. 72) unis par des tringles en fer qui tournent à leur jonction sur les poteaux, de façon à permettre à ceux-ci de s'éloigner ou de se rapprocher l'un de l'autre, sans cesser d'être parallèles.

Le poteau *a* est fixe, et fortement encastré dans le bajoyer. L'autre poteau *b* est mobile; on le rapproche du premier quand on veut ouvrir la porte. Cette manœuvre s'opère à l'aide d'une vis en fer de $0^{m}08$ de diamètre.

On emploie aujourd'hui un moyen plus simple pour soutenir les

extrémités d'une porte tournante simple. Les obstacles mobiles se composent de deux *poteaux tournants*. Ce sont des cylindres verticaux dont on a retranché un segment par un plan vertical contre lequel vient s'appuyer la porte quand elle est fermée, et qui, selon le sens où il est tourné, s'oppose à la pression de l'eau du bassin de retenue ou à celle de la mer haute. La rotation de chaque poteau tournant s'opère au moyen d'un levier engagé dans sa partie supérieure.

Les deux exemples suivants compléteront la description des portes tournantes isolées; ils conviennent spécialement à des vantaux de 6 à 7 mètres de hauteur et de 5 à 6 mètres de largeur.

1° *Portes simples, sans vantelle.* — Le débouché ayant $6^{m}53$ de largeur, on a donné $6^{m}44$ de largeur à la porte, afin de conserver un jeu de $0^{m}045$ de chaque côté du passage, et on a divisé le vantail en deux parties inégales, en plaçant l'axe du poteau-tourillon à $4^{m}12$ et à $2^{m}32$ de chaque extrémité respective.

La charpente se compose de 2 poteaux butants, d'un poteau-tourillon, et de sept montants intermédiaires, fortement moisés en haut et en bas; elle possède, en amont et en aval, un bordage en madriers horizontaux, de $0^{m}06$ d'épaisseur, assemblés à recouvrement; ces madriers sont fixés à chaque poteau par un boulon, et portent sur une large feuillure des poteaux tournants extrêmes.

Les dimensions de toutes ces pièces sont indiquées au dessin (fig. 73.)

La section horizontale de la porte présente la forme qui convient à une solive d'égale résistance; son épaisseur est de $0^{m}55$ au milieu, et se réduit à $0^{m}32$ et $0^{m}30$ aux extrémités.

Si l'on suppose que le radier soit composé d'un plancher sur traversines, on peut former le seuil (fig. 73, A B) de cinq pièces de bois assemblées avec boulons, et disposées de manière que la partie supérieure, façonnée en dos d'âne, vienne affleurer le bas de la porte.

Les poteaux tournants, taillés dans des cylindres de $0^{m}50$ de diamètre, sont retenus à la tête par des colliers scellés aux bajoyers, et portent au pied un pivot de rotation.

Le poteau-tourillon de la porte tourne dans deux crapaudines, fixées au seuil et dans la charpente du pont de service jeté en travers du passage de l'écluse.

Nous reviendrons sur ce genre de portes dans les applications militaires.

2° *Porte simple, avec vantelle.* — La porte ayant, par exemple, 5m00 de largeur et 6m00 de hauteur, son axe de rotation la divisera en deux ailes de 2m60 et de 2m40 (fig. 74.)

Elle se compose :

1° d'un poteau-tourillon, de 6m80 de hauteur et d'un équarrissage de 0m46 sur 0m36. Il est arrondi sur une hauteur de 0m15, à son pied, en cylindre de 0m30 de diamètre; un semblable arrondissement existe sur une hauteur de 0m30, à partir de 0m35 de son autre extrémité, et le bas de cette dernière partie présente une échancrure circulaire pour le mouvement au-dessus des boulons du collier ;

2° de deux poteaux-butants de même hauteur que la porte et d'un équarrissage de 0m27 sur 0m30;

3° de quatre moises jumelles, embrassant le poteau-tourillon en haut et en bas. Elles ont 0m30 de hauteur et autant de plus grande épaisseur ;

4° de six entretoises, dont la hauteur est de 0m25, et qui ont une épaisseur de 0m30 contre le poteau-tourillon;

5° de quatre bracons, de même largeur et de même épaisseur que les entretoises ;

6° d'un montant, pour soutenir une des coulisses de la vanne; son équarrissage est de 0m20 sur 0m30;

7° d'un double revêtement, formé de madriers de 0m05 d'épaisseur sur 0m30 de largeur, et d'une seule pièce dans la largeur du revêtement;

8° d'une vantelle de 1m12 de largeur sur 1m25 de hauteur, composée de madriers de 0m04 d'épaisseur, assemblés à rainures et languettes se recroisant à angle droit, et cloués les uns contre les autres. Les pièces des coulisses ont 0m16 de largeur et autant d'épaisseur; elles sont attachées au moyen de 16 boulons à écrou de 0m15 d'éqarrissage à la tige.

Les madriers des revêtements sont fortement serrés entre eux, et s'engagent dans des feuillures de 0m10 de côté, taillées dans l'encadrement de la porte; ils sont liés deux à deux, à 0m15 de chaque extrémité, par un boulon à écrou de deux centimètres de diamètre.

Avant d'assembler les pièces, on enduit les tenons d'une couche épaisse de blanc de céruse à l'huile; tous les joints sont ensuite calfatés et brayés avec le plus grand soin ; enfin, quand la porte est mise en place, on la goudronne en deux couches sur toutes les faces.

La porte est soutenue supérieurement par un chapeau, formé de deux poutres en bois de chêne de 6$^{m}$00 de longueur chacune, et d'un équarrissage de 0$^{m}$30 sur 0$^{m}$45. Celles-ci sont juxtaposées et engagées dans la maçonnerie des piles.

A l'intérieur de la plus longue aile, on place un valet destiné à serrer la porte contre la battée. Il consiste en une poutre en bois de chêne, de 6$^{m}$00 de longueur, d'un équarrissage de 0$^{m}$40 sur 0$^{m}$25, et arrondie comme il est indiqué fig. 74 (coupe *mn*.)

On l'attache à un arbre en fer, de 6$^{m}$50 de longueur et de 0$^{m}$05 de côté, au moyen de six traverses en fer, de 0$^{m}$05 de largeur sur 0$^{m}$02 d'épaisseur moyenne. Cet arbre est cylindrique, sur une hauteur de 0$^{m}$08 dans sa partie inférieure, et de 0$^{m}$30 à l'endroit où il doit s'engager dans le chapeau de la porte. Il tourne en bas sur une crapaudine en bronze scellée au plomb dans le seuil, et en haut, dans un collet, aussi en bronze, logé dans le chapeau.

On tourne le valet au moyen d'un levier en fer de 0$^{m}$90 de longueur sur 0$^{m}$04 de côté, ayant à l'une de ses extrémités un œillet carré pour embrasser l'arbre.

Les petites vannes qu'on a adaptées aux portes tournantes permettent de fermer celles-ci contre la pression, et d'arrêter ainsi à volonté la chasse, en cas d'accident aux ouvrages ou aux navires.

Ces vantelles permettent aussi de maintenir les portes dans une direction parallèle à l'axe du pertuis pendant l'écoulement des eaux de la retenue et sous l'action du flux.

## PORTES TOURNANTES COUPLÉES.

Quand la largeur de l'écluse atteint 6 à 7 mètres, et qu'on veut éviter l'emploi de pièces d'un fort équarrissage, on ferme le pertuis par deux portes, dites *couplées*, manœuvrant ensemble, et ayant leur centre de rotation sur une même perpendiculaire à l'axe du passage. Les deux grandes ailes s'appuient alors contre un poteau tournant dont

le centre se trouve sur cet axe, mais, au delà de l'intersection des deux lignes précitées. L'intervalle qui existe entre les deux portes est plus petit que la largeur du poteau tournant et plus grand que son épaisseur; on conçoit donc, qu'en faisant exécuter à ce poteau un quart de rotation à l'aide d'un treuil, les deux extrémités qui butent contre lui s'échappent en même temps, et s'ouvrent sous l'action de la charge d'eau du bassin de retenue. Lorsque la mer remonte dans le bassin, elle fait tourner les portes en sens contraire jusqu'à ce qu'elles aient exécuté une demi-rotation complète; le flux continue ainsi, et remplit la retenue. Vers la fin de la marée montante, l'éclusier remet le poteau dans sa position primitive; dès lors, aussitôt que le reflux commence, l'eau qui s'écoule du bassin ferme les portes qui viennent de nouveau buter contre le poteau tournant, et le système est disposé naturellement pour une nouvelle chasse.

En manœuvrant le poteau tournant avant le flux, on pourrait empêcher l'eau de la mer haute de rentrer dans le bassin de retenue, si cela était jugé nécessaire.

La figure 75 donne les détails des portes tournantes couplées qui ferment l'un des pertuis de l'ancienne écluse de chasse d'Ostende.

Cette écluse, dite *française*, a été construite en 1810 (fig. 84). Elle a deux passages de 6 mètres, l'un fermé par une seule porte tournante, l'autre par une porte à deux vantaux couplés, butant contre un poteau tournant placé au milieu et contre deux petits poteaux demi-cylindriques mobiles enclavés dans les bajoyers.

Les deux vantaux sont identiques. Ils n'ont point de bordages. Chacun d'eux a $2^m78$ de largeur; il est formé de 7 montants verticaux, y compris le poteau tournant et les deux poteaux-butants extrêmes, ayant une épaisseur variable entre $0^m20$ et $0^m28$, reliés par des ferrures méplates et assemblés à rainures et languettes. Ces montants sont maintenus en haut et en bas par de fortes moises, boulonnées entre elles et assemblées par redans avec les montants.

Chaque porte est divisée par l'axe de son poteau-tourillon en deux ailes, qui ont respectivement $1^m82$ et $0^m96$ de largeur. Ce poteau tourne en bas dans une crapaudine femelle scellée dans le radier, et à sa partie supérieure dans la charpente du pont de service qui embrasse sa tête circulaire.

La rotation du poteau tournant de manœuvre s'effectue de la même manière. La section de celui-ci est de 0m50 en largeur sur 0m32 d'épaisseur, y compris la saillie des ferrures.

Lorsque le passage est fermé, les deux extrémités des grandes ailes laissent entre elles un intervalle de 0m36. Si l'on compare cette longueur aux dimensions en largeur et épaisseur du poteau tournant du milieu, on comprend facilement la manœuvre. Pour ouvrir la porte, on commence par faire rentrer dans leurs enclaves les deux poteaux tournants demi-cylindriques des bajoyers; les deux vantaux n'ont plus alors pour appui que le poteau du milieu, qui leur oppose sa largeur. Agissant ensuite par un cordage à l'extrémité du levier en fer *mn*, on fait exécuter un quart de conversion au poteau qui, ne présentant plus aux vantaux que son épaisseur, les laisse s'échapper et ouvrir le passage.

## PORTES BUSQUÉES AVEC VANTAIL DE CHASSE.

Dans quelques écluses de navigation, et même dans certaines écluses de bassins à flot, on s'est procuré le moyen de donner des chasses en plaçant des portes tournantes dans le châssis des portes d'ebbe.

Dans le principe, on a fait des vantaux tournants qui occupaient tout l'espace intérieur des vantaux fixes. Mais le poids considérable des premiers fatiguait outre mesure la partie fixe et en abrégeait la durée; en outre, malgré l'addition de vantelles qui permettaient une manœuvre lente, il se produisait parfois des accidents, des ruptures subites, provenant de l'énorme pression supportée par la partie mobile, dont il était difficile d'augmenter les équarrissages.

Les faibles dimensions relatives données aujourd'hui à la surface des portes tournantes enchâssées ne sont cependant pas une garantie certaine des accidents; ainsi les premières portes enchâssées de l'écluse militaire d'Ostende, qui n'avaient guère que la moitié de la surface des portes d'ebbe, ont été emportées dès les premières chasses; elles ont été remplacées par celles qui sont détaillées à la fig. 76 et qui ont duré bien des années, quoique la partie tournante ait conservé la même surface relative. Ces dernières ont fait place aux portes actuelles (fig. 70) dont nous parlerons plus loin.

La porte tournante indiquée fig. 76 occupait presque la moitié de la hauteur d'un vantail de la porte d'ebbe, et toute la largeur entre le poteau busqué et le poteau-tourillon. Son axe de rotation la divisait en deux ailes, dont les largeurs respectives étaient de 3m34 et de 2m34, c'est-à-dire à peu près dans le rapport de 3 à 2.

Un grand valet *aa*, placé en aval et retenu par un verrou, servait d'appui à la porte tournante quand elle était fermée. Lorsqu'on tirait le verrou, le valet tournait sur ses gonds *bb*, et cédant à la pression de la grande aile, venait s'appliquer contre l'enclave de la porte busquée.

Quoique la charpente de cette dernière fût d'un équarrissage extraordinaire eu égard à la largeur de l'écluse, les poteaux busqués ont baissé de cinq à six centimètres. Cet inconvénient du reste est plus à craindre dans ce cas-ci que dans les portes d'ebbe ordinaires, puisque la position des portes tournantes enclavées empêche d'incliner favorablement les écharpes en fer et d'employer un nombre suffisant d'entretoises et de bracons.

Nous citerons encore la porte enchâssée de la Cunette à Dunkerque, qui présente une très-longue durée, quoiqu'elle occupe presque toute la superficie du châssis qui la contient. Il est vrai que la porte busquée possède un bracon et qu'elle n'a que 10 mètres de largeur.

Cette porte enchâssée diffère de la précédente en ce que son axe de rotation se trouve placé à peu près au milieu, et qu'elle est manœuvrée à l'aide de deux vantelles ouvertes dans l'aile la plus grande, ce qui permet d'arrêter à volonté l'écoulement. Une espagnolette en fer *mm* (fig. 77) remplace le valet en bois de l'écluse précitée, et contribue à diminuer la fatigue de l'aile opposée aux vantelles.

Quand on veut faire une chasse, on rend libre l'espagnolette *mm*, en lâchant le loquet *b*, fixé à la traverse supérieure de la porte busquée, et on lève les vantelles de l'aile la plus large. La pression devient prédominante sur l'aile opposée, celle-ci pousse les pannetons *ccc* de l'espagnolette, et la porte s'ouvre entièrement.

Pour fermer le pertuis avant la fin d'une chasse, il suffit de baisser peu à peu les vantelles ; la pression, de ce côté, devenant prédominante, la porte pivote lentement, et reprend sans chocs ni à-coups sa position primitive.

## PORTES EN ÉVENTAIL.

Le système des écluses à éventail, fréquemment employé en Hollande, consiste à ajouter à chaque vantail des portes d'ebbe ordinaires un autre vantail, plus long de $\frac{1}{6}$ à $\frac{1}{4}$, solidaire avec lui, et ayant le même poteau-tourillon (fig. 78).

Quand la porte busquée est fermée, le grand vantail se trouve dans l'alignement des bajoyers. Derrière lui se trouve une chambre angulaire disposée de façon à permettre la rotation du système jusqu'à ce que la porte busquée arrive à son tour sur l'alignement primitif du grand vantail, c'est-à-dire sur le prolongement du parement intérieur de l'écluse. Dans cette deuxième position de l'éventail, le pertuis est ouvert et la chasse s'opère.

Des aqueducs latéraux, pratiqués dans le massif des bajoyers, et munis de vannes, débouchent dans l'espace angulaire, et le font communiquer avec l'amont ou l'aval. Dans le premier cas, l'écluse est fermée; dans le second, la pression contre le grand vantail étant prédominante, le système cède, tourne autour de son pivot, et va se loger dans l'enclave angulaire. La vitesse de rotation peut être limitée à volonté, puisqu'elle dépend de celle de la manœuvre des vannes.

L'expérience a prouvé que les portes en éventail sont généralement préférables aux autres systèmes de portes tournantes. Outre qu'elles procurent une fermeture plus hermétique et qu'elles sont moins sujettes aux chances de rupture, elles ont l'avantage de pouvoir se manœuvrer dans les deux sens avec une égale facilité, soit pour ouvrir, soit pour fermer le passage; cette manœuvre peut s'exécuter sous les plus fortes comme sous les plus faibles pressions d'eau, en un instant quelconque de la chasse.

Leurs désavantages consistent à être coûteuses et à exiger un grand espace pour leur logement. C'est pour obvier à ce dernier inconvénient que le capitaine *Alewyn*, du génie hollandais, a imaginé le système qui porte son nom, et qui est rapporté dans le cours de fortification du major du génie *Fallot*. Malheureusement, l'expérience n'a pas sanctionné l'efficacité de cet ingénieux système, employé jadis au canal de Terneuzen à Gand.

La condition la plus importante à remplir dans une porte en éventail, c'est que l'angle compris entre l'éventail et la porte busquée reste constant. A cet effet, on réunit ces deux vantaux par deux ou trois liens, qui s'assemblent à queue d'hironde dans les entretoises, celles-ci devant être situées au même niveau pour obtenir un maximum de résistance.

Dans les portes de grandes dimensions, on doit soutenir ces liens par des traverses (fig. 80), assemblées d'une part dans le poteau-tourillon, et de l'autre dans un montant placé au milieu de l'angle et en dehors du dernier lien. Ces pièces forment ainsi un pan de bois vertical que l'on renforce quelquefois par des croix de Saint-André. Les traverses s'assemblent au montant extérieur à tenons et mortaises chevillés ; leur assemblage avec le poteau-tourillon est à queue d'hironde coincé.

Comme dans les écluses ordinaires, on donne une excentricité de quelques centimètres aux pivots du poteau-tourillon.

Les portes en éventail tendent plus que les autres à donner du nez ; aussi, on évite cet inconvénient en les faisant tourner, par le haut, dans une poutre qui s'appuie d'une part contre le chardonnet et de l'autre contre l'angle opposé de la cage ; elle sert en même temps à supporter un plancher dont on recouvre celle-ci, pour empêcher la chute de corps étrangers qui pourraient gêner la manœuvre.

Il ne doit y avoir que très-peu de jeu entre le grand vantail et le radier de la cage ; le premier doit aussi être très-rapproché des murs circulaires.

La description suivante complétera les détails nécessaires pour l'établissement d'une écluse à portes en éventail. Elle s'applique à une écluse construite dans une des forteresses du pays, et de 5 mètres d'ouverture.

Les bajoyers reposent sur une base commune, formée par un plancher sur grillage et pilotis, ainsi que nous l'avons décrit au chapitre IX. La surface supérieure du plancher se trouve à un niveau coté 3,55, excepté sous les enracinements.

Les maçonneries des bajoyers s'élèvent jusqu'à la cote 10 ; elles sont couronnées d'une pierre de taille de $0^m20$.

Leur épaisseur au pied est de $4^m00$ ; mais les parties qui corres-

pondent aux chambres ont une saillie de 3m00 sur 10m50 de longueur extérieure (fig. 79), et une épaisseur, au pied, de 3m00.

Les parements sont verticaux des deux côtés du profil. L'épaisseur au sommet coté (10,20) se réduit à 3m00, sauf devant les chambres, où elle n'a que 2m50.

Chaque bajoyer est traversé, sur la longueur, par un aqueduc de manœuvre, ayant 0m70 de largeur et 1m50 de hauteur sous-clef; le radier est établi à la cote 4,50.

Ces aqueducs sont fermés chacun par trois vannes.

Le radier de l'écluse est en maçonnerie; il a la forme d'une voûte renversée de 0m50 de flèche et d'autant d'épaisseur à la clef. Le point le plus bas de son intrados est à la cote 4,50

Cette voûte est interrompue à l'emplacement des portes et des rainures pour barrages ; en ces endroits, la surface du radier est horizontale.

Le busc de l'écluse a pour base une ligne tracée perpendiculairement à l'axe du passage, et pour saillie une droite passant à angle droit par le milieu de la précédente et ayant 1m00 de longueur. La surface supérieure du busc se trouve à la cote 4,50; celle du radier des portes ainsi que des heurtoirs des éventails, à la cote 4,30; et celle des radiers des éventails à la cote 4,13 (fig. 79).

La projection de l'arrondissement du chardonnet (fig. 81) est un arc de cercle *bc*, dont le centre O est placé de manière que la porte ouverte ait sa face extérieure à 0m15 dans œuvre de la joue du bajoyer, et qui a le même rayon que l'arrondissement du poteau-tourillon, c'est-à-dire 0m22. Cet arc commence à son point de contact avec le heurtoir de la porte.

Voici comment on doit procéder pour déterminer, dans des circonstances semblables, le délardement du chardonnet ainsi que la position respective et les dimensions des différentes parties du système.

Afin que le poteau-tourillon soit en contact avec le chardonnet sur toute l'étendue de l'arc *bc* quand la porte est fermée, il faut que, dans cette position, le centre de son arrondissement se projette en O; par conséquent, la battée *bb'* à tailler pour la partie inférieure de ce poteau se trouvera en partie sur la circonférence décrite du point O comme centre avec un rayon de 0m22.

Après avoir déterminé le centre O, il faut arrêter la longueur de la porte; elle sera ici de 3m26 à peu de chose près, et telle qu'il y ait, entre les deux portes fermées, un contact de 0m12 de largeur. La longueur de l'autre panneau de l'éventail s'en déduira; elle sera à celle de la porte proprement dite dans le rapport de 6 à 5, c'est-à-dire d'environ 3m91.

Pour éviter qu'il se produise, pendant la manœuvre, un frottement entre le chardonnet et le poteau-tourillon, on donnera à la crapaudine un autre centre qu'à l'arrondissement de la pierre. Ce second centre O″ sera déterminé par cette condition que, la porte étant ouverte, il y ait entre les deux surfaces un jeu de 3 centimètres. La nouvelle circonférence sur laquelle se projettera, dans cette nouvelle position, l'arrondissement du poteau-tourillon indiquera, sur une partie *b′b″* de son cours, la continuation de la battée à tailler pour le pied de ce poteau; le point *b′* est celui où elle coupe la première circonférence.

L'axe de rotation de la porte devant passer par ce second centre O″, ce point sera, en même temps, le centre de l'arrondissement *fg* (fig. 78) de la chambre de l'éventail; on tracera cet arrondissement avec un rayon tel qu'il y ait un intervalle de 2 centimètres entre l'éventail et la paroi de la chambre

On tracera aussi la battée verticale *gh* (fig. 78) de la porte fermée; une de ses faces sera sur le prolongement de la joue du bajoyer; son épaisseur sera de 0m80 à l'arrondissement de la chambre, et sa longueur de 0m32.

Le grand panneau de l'éventail devant avoir 0m25 d'épaisseur au poteau-butant, et 0m30 contre le poteau-tourillon, on en déterminera alors la direction au moyen de ces données, dans la position de la porte fermée; et la projection *gb″* de la surface intérieure donnera le tracé de son heurtoir, ainsi que la limite *b″* de la battée arrondie pour le pied du poteau-tourillon.

On déterminera ensuite la position de la face extérieure du grand vantail, la porte étant censée ouverte, d'après la condition que, dans cette position, la face extérieure de la porte, ou petit vantail, soit parallèle à la joue du bajoyer. En reliant par une ligne légèrement courbe la projection *fdc′* de cette face du grand panneau avec l'arc *bc*, on achèvera le tracé du chardonnet. La même projection déterminera

aussi la position de la battée verticale contre laquelle le grand vantail devra s'appuyer quand la porte sera ouverte ; cette battée aura, comme la première, 0m32 de saillie dans la chambre circulaire.

La battée à tailler suivant la ligne *gb''b'bcc'd* ainsi déterminée, descendra jusqu'au radier de l'éventail.

La droite qui joindra le point *h* au point qui lui correspond de l'autre côté du pertuis déterminera, du côté d'amont, la limite du radier des portes dans le passage de l'écluse.

Le busc, les radiers précités et les heurtoirs sont construits en pierre de taille, et appareillés comme il est indiqué fig. 79.

Chaque porte, proprement dite, a 5m62 de hauteur ; sa largeur, ainsi que nous l'avons vu, est à peu près de 3m26. L'autre panneau de l'éventail a une hauteur de 5m82, et sa largeur, déduite de celle de la porte, est d'environ 3m91.

Une porte et son grand vantail sont portés par le même poteau-tourillon. Celui-ci a 6m20 de hauteur, et 0m55 sur 0m55 d'équarrissage avant son délardement ; ses deux extrémités sont arrondies en cylindre de 0m16 de rayon, sur une longueur de 0m20 en haut et de 0m10 en bas. Les axes des deux cylindres sont situés sur la verticale passant par le centre déjà déterminé de la crapaudine. Une des faces du poteau étant mise dans la face antérieure de la porte, la face contiguë a été délardée de manière à venir dans la face extérieure du grand vantail, dont la direction avait été déterminée de la façon indiquée plus haut. L'angle intermédiaire a été arrondi avec un rayon de 0m22 et d'un centre qui doit se trouver sur la verticale passant par celui de l'arrondissement du chardonnet quand la porte est fermée. Les deux autres faces correspondent, l'une à l'épaisseur de la porte, l'autre à celle du grand vantail, mais l'arête située entre ces deux faces a été abattue en chanfrein de manière qu'il ne restât à la première que 0m35 de largeur et à la seconde que 0m30 (fig. 82).

Outre le poteau-tourillon, la porte comprend un poteau busqué, deux entretoises extrêmes, quatre entretoises intermédiaires et un bracon.

Le poteau busqué a 5m95 de longueur, et un équarrissage de 0m30 sur 0m35. Son délardement est tel que, les portes étant fermées, elles aient dans toute leur hauteur un contact de 0m12 de largeur.

Les entretoises supérieure et inférieure ont une épaisseur de 0m35 contre le poteau-tourillon, et de 0m30 contre le poteau busqué; leur hauteur est de 0m35. Elles s'assemblent avec chacun d'eux par un tenon taillé à tiers-bois avec embrévement.

Les entretoises intermédiaires ont 0m30 d'épaisseur contre le poteau-tourillon, et 0m25 contre le poteau busqué; leur hauteur est de 0m30. Elles s'assemblent avec les poteaux à tenons et mortaises, avec renforcement de tout le bois sur 0m03.

Les entretoises sont également espacées; les intermédiaires affleurent les faces des poteaux du côté d'aval.

Le bracon a 0m40 de largeur; son épaisseur contre le poteau-tourillon est de 0m25, et de 0m20 seulement contre le poteau busqué. Il affleure le cadre de la porte du côté d'amont.

Les extrémités de cette pièce s'assemblent par embrévement avec le poteau-tourillon et l'entretoise supérieure; le corps du bracon s'assemble en outre avec chacune des entretoises intermédiaires par une entaille faite dans chaque pièce et un embrévement; cette entaille a, en profondeur, la moitié de l'épaisseur du bracon au point de rencontre, diminuée des 0m05 dont il ressort de l'entretoise.

La porte est revêtue en amont d'un bordage de 0m05 d'épaisseur, qui affleure le cadre. Ce bordage repose en partie dans des feuillures de 0m05, entaillées dans les entretoises extrêmes le poteau busqué et le bracon, et en partie dans une rainure biaise pratiquée dans le poteau-tourillon. Les madriers sont parallèles au bracon, et formés d'une seule pièce.

Le grand vantail est formé sur le poteau-tourillon :

1° par un poteau-butant de 6m12 de longueur, et de 0m35 sur 0m25 d'équarrissage;

2° par une entretoise supérieure, dont l'épaisseur contre le poteau-tourillon est de 0m30, et de 0m25 contre le poteau-butant; sa hauteur est de 0m35;

3° par une entretoise inférieure de même équarrissage que la précédente, mais de 0m45 de hauteur;

4° de quatre entretoises intermédiaires, ayant 0m20 d'épaisseur contre le poteau-tourillon, et 0m15 contre le poteau-butant, sur une hauteur de 0m30;

5° de deux bracons, ayant 0m40 de largeur sur 0m15 d'épaisseur contre le poteau-tourillon et 0m125 contre le poteau-butant.

Toutes ces pièces sont disposées et assemblées comme dans la porte, les entretoises étant élevées à la même hauteur que dans celle-ci, excepté l'entretoise inférieure, dont le dessous est à 0m20 plus bas que celui de l'entretoise correspondante de la porte proprement dite.

Les deux faces du grand vantail sont revêtues d'un bordage de 0m05, construit comme il vient d'être dit, avec cette exception toutefois, que les madriers reposent dans des feuillures sur tout le périmètre.

Les deux vantaux de l'éventail sont liés entre eux par neuf étrésillons, dont cinq grands. L'équarrissage de ces pièces est de 0m15 sur 0m20; elles sont soutenues par six traverses horizontales de 0m15 sur 0m10, engagées d'une part dans le poteau-tourillon, et soutenues de l'autre par un montant de 5m65 de longueur et du même équarrissage (fig. 80).

Les étrésillons portent sur les traverses dans des entailles de 0m05 de profondeur.

Tout le système est encore maintenu par un bracon de décharge, de 0m15 sur 0m10, portant en bas par un embrévement de 0m05 dans le chanfrein du poteau-tourillon, et soutenant par sa partie supérieure le montant par un embrévement semblable.

Chaque traverse est fixée sur le montant et sur le bracon de décharge par un boulon à clavette de 0m02 de diamètre.

Avant le placement des pièces, on a goudronné les tenons, les mortaises et les tranches des madriers de bordage, et interposé ensuite dans les assemblages du papier épais ou toute autre substance propre à s'opposer à l'infiltration. Les clous et les chevilles ont été au préalable plongés dans le goudron et enveloppés d'étoupes. Enfin, tous les joints ont été calfatés et brayés avec soin, et, après la mise en place, on a goudronné le tout en deux couches.

## DES CHASSES.

A l'origine des chasses, surtout si les pertuis de l'écluse débouchent dans une section beaucoup plus large que la leur, il se produit des remous, des tourbillons de fond et de côté, qui absorbent une partie de la vitesse initiale. Il en résulte, que le courant ne devient régulier qu'à une certaine distance de l'écluse, distance qui varie généralement de 200 à 300 mètres.

A Ostende, par exemple, si l'on faisait une chasse au moyen de l'écluse militaire seule, il se produirait sur la gauche un grand tournant qui absorberait une portion de la hauteur de la charge.

A sa sortie des pertuis, l'eau se répand dans l'avant-port et le chenal, dont elle élève le niveau et où elle forme, entre les écluses et la tête des jetées, comme une seconde retenue intermédiaire, d'où l'eau s'écoule vers la mer avec plus ou moins de force. C'est là que se produit la véritable chasse, celle dont l'effet est le plus efficace et qui attaque les atterrissements d'ordinaire les plus nuisibles. Au bout de quelques minutes, le niveau de cette retenue factice s'abaisse, et l'action utile de la chasse disparait.

Entre les jetées qui terminent le chenal, l'écoulement des eaux est assez régulier. Arrivé à la mer, le courant s'incline un peu du côté de la jetée la plus courte ou du courant de flux, et sa vitesse diminue notablement, tant à cause de l'élargissement brusque de la section que de l'agitation des vagues qui le rompent et le forcent à s'épanouir en éventail.

Pour atténuer l'influence des remous et tourbillons qui consomment une grande partie de la vitesse, et par conséquent de la puissance des chasses, il faudrait pouvoir diriger l'eau, au moyen de parois ou coursiers agissant sur le fond et latéralement, à l'entrée et à la sortie des écluses. Ce résultat est difficile à obtenir; cependant il serait possible de le réaliser dans certaines circonstances, en s'efforçant, avant tout, de placer le courant des chasses dans l'axe même du chenal et du bassin de retenue, ainsi qu'on le fait à la nouvelle écluse en construction.

D'un autre côté, comme le courant ne se porte pas toujours sur les

atterrissements que l'on veut enlever, on emploie divers procédés pour en modifier la direction.

Le moyen le plus usité et le plus efficace consiste à échouer provisoirement un grand radeau, composé d'un grillage avec plancher, et disposé de façon à pouvoir prendre une position inclinée sur le fond. Le courant qui vient frapper ce plancher est donc obligé de suivre la direction déterminée par l'échouage. Ces obstacles, désignés sous le nom de *guideaux,* s'amarrent à marée haute, et se placent les uns à la suite des autres.

Quand les atterrissements se forment d'une façon continue, en des endroits bien déterminés et invariables, on y conduit les eaux des chasses au moyen d'obstacles submersibles permanents, c'est-à-dire d'espèces de guideaux fixes que les Anglais appellent des *turn-water-apron,* et qu'ils ont exécutés à l'entrée de plusieurs ports, notamment à Douvres.

On emploie aussi, dans le même but, des pontons échoués, des digues en tunages ou en fascines piquetées, etc.

Nous terminerons ce chapitre par un exposé des effets observés sur l'action des chasses que l'on exécute à Ostende au moyen de l'écluse militaire et de l'ancienne écluse, dite française.

Les chasses se font aux syzygies, pendant cinq à sept jours consécutifs. On ouvre d'abord l'écluse française ; puis, deux à trois minutes après, l'écluse militaire, avec le même personnel d'éclusiers.

Le courant de chacune d'elles, pris isolément (fig. 83), aurait une direction oblique sur l'axe du chenal, mais leur résultante donne à peu près dans la direction de ce dernier. Le courant ne devient régulier qu'à 300 mètres environ en aval de l'écluse. Il arrive, sous forme d'une petite vague, au bout des jetées, à peu près 15 minutes après l'ouverture des pertuis. Comme les écluses continuent entre-temps à déverser la masse des eaux des retenues dans le chenal, il se forme dans celui-ci, entre les pertuis et la tête des jetées, une pente de surface qui forme le courant de chasse. Cette pente ou courbe de remous atteint un maximum, puis diminue régulièrement, et cesse, au bout d'une demi-heure, d'avoir une action sensible.

A sa sortie des jetées, le courant rencontré par le jusant qui porte

vers l'Ouest s'incline un peu de ce côté: il perd peu à peu sa vitesse et s'épanouit en éventail dans la mer.

L'action de la chasse sur la barre (banc de sable devant le port) se fait sentir à 200 mètres en dehors des jetées; les points culminants de cette barre se trouvent ordinairement de 100 à 150 mètres en dehors de ces dernières. Les variations en hauteur de l'atterrissement sont comprises entre le zéro et la cote 1m00 de l'échelle du pilotage, ce zéro se trouvant à 1m48 sous la basse mer de vive eau ordinaire.

Le débouché total et réel de l'écluse de chasse française (fig. 84) a 10m65 de largeur, ainsi déduite :

| | |
|---|---|
| pour deux passages de 6 mètres. . . . . | 12m00 |
| à déduire les épaisseurs des 3 portes et du valet . | 1m35 |
| Reste. | 10m65 |

La surface du bassin de retenue est de 24 hectares 90 ares; sa capacité, à marée haute de vive eau ordinaire, est de 602,000 mètres cubes. Il met 2 1/2 heures à se vider plus ou moins, l'écoulement n'étant pas terminé avant l'arrivée du flux; il reste environ 0m90 d'eau sur le busc, qui se trouve à 0m45 au-dessus de la basse mer de vive eau.

La hauteur de chute varie de 3m20 à 4m20 d'après l'amplitude des marées.

Les portes des deux pertuis se placent à peu de chose près dans des directions parallèles aux axes pendant la durée de la chasse et de la retenue.

Nous donnerons au chapitre suivant ce qui se rapporte aux chasses de l'écluse militaire.

# CHAPITRE TREIZIÈME.

## ECLUSES MILITAIRES.

---

### BUT ET CONDITIONS.

Les écluses militaires ont, en général, pour but de faire varier la hauteur d'eau dans les fossés d'un ouvrage, et, suivant les circonstances, de les dessécher ou d'y faire des chasses pour ruiner les travaux de l'ennemi.

Quelquefois aussi, elles sont destinées à tendre des inondations défensives, soit en barrant un cours d'eau, soit en donnant accès aux eaux de la mer ou d'un bassin de retenue, sur les terrains submersibles à proximité.

Afin de ravir à la défense les précieux avantages qu'elle pourrait tirer des manœuvres d'eau, l'assiégeant dirigera contre les retenues et les écluses tous les moyens de destruction dont il dispose. Elles doivent donc être à l'abri des feux verticaux et des feux directs. Il en résulte que l'ouverture d'une écluse militaire doit être réduite le plus possible, pour augmenter la résistance des voûtes à l'épreuve qui la couvrent, et diminuer la hauteur ainsi que la surface exposée au tir de l'ennemi. La limite maxima de cette largeur est de $8^{m}00$, les voûtes à l'abri de la bombe ne pouvant guère couvrir un espace plus considérable.

Cependant, comme ces écluses doivent agir rapidement, afin d'ôter à l'assiégeant le temps de se mettre en mesure contre leurs effets, et comme la quantité d'eau qui s'écoule est en rapport direct avec la sec-

tion des pertuis, ceux-ci doivent avoir toute la largeur compatible avec la condition posée en premier lieu.

Des considérations précédentes on peut conclure qu'il sera convenable, la plupart du temps, de partager la section d'écoulement en plusieurs pertuis séparés, dont la somme des sections soit supérieure à l'orifice du passage unique jugé nécessaire, attendu qu'il faut tenir compte de la contraction de la veine fluide.

Les portes tournantes et les barrages à poutrelles mobiles soutenues par un valet sont préférables aux écluses à portes busquées, et à plus forte raison aux écluses à éventail, lorsqu'il s'agit d'écluses de chasse, à moins que les manœuvres ne doivent avoir lieu dans les deux sens, comme le cas se présente dans les places voisines du littoral et dans les ports de mer. Par mesure de prudence, et pour s'opposer aux filtrations supérieures, il conviendra généralement d'accompagner les portes tournantes ou les poutrelles d'une seconde clôture analogue, en plaçant, par exemple, des portes busquées en amont.

Il est nécessaire aussi de ménager dans les bajoyers un certain nombre de coulisses verticales, pour y établir, comme retenues, deux rangées de poutrelles, séparées par un intervalle de $2^{m}00$ à $2^{m}50$, qu'on peut combler de terre ou de fumier pendant le siége.

Enfin, comme les manœuvres d'eau les plus efficaces et les plus énergiques ont lieu dans la dernière période du siége, la communication entre la forteresse et l'écluse doit être sûre, parfaitement couverte ou défilée contre les projectiles ennemis, non-seulement au début mais encore, et surtout, à l'époque où l'assiégeant exécutera le passage du fossé.

## ÉCLUSES DE LA CITADELLE-NORD-D'ANVERS.

### Description générale.

Chaque écluse (fig. 85) se compose de trois passages voûtés ; de deux façades, l'une d'aval du côté de l'Escaut, l'autre d'amont, vers le polder, avec murs en aile et en retour ; de deux paires de portes busquées dans chaque passage ; de trois vannes doubles, avec chambre voûtée pour leur manœuvre ; de coulisses de barrage dans les tête

des piles et culées; et, enfin, d'avant-radiers et d'ouvrages en fascinages aux deux issues.

Les pertuis ont leur radier à la cote (0,00), depuis la bordure du radier d'amont jusqu'à la première porte de flot, et à la cote (0,30), depuis la porte de flot d'aval jusqu'à la bordure de l'avant-radier de ce côté.

Chaque ouverture, de 2m50 de largeur, est couverte par une voûte en plein cintre, excepté aux enclaves des portes de flot, où la largeur est de 2m90, et le plein cintre remplacé par un arc de cercle de 0m45 de flèche.

L'empatement des culées est de 0m40 pour les parties qui ont 1m60 d'épaisseur, et de 1m00 pour les autres parties, excepté à la galerie, où il n'est que de 0m75. Ces différences d'épaisseur sont rachetées à la hauteur du radier par des retraites successives de la maçonnerie.

Les têtes des piles et des culées s'avancent de 1m00 sur les avant-radiers; elles sont arrondies en demi-cercle, et leurs pierres de couronnement sont terminées par des portions coniques de 0m15 de hauteur.

La galerie pour la manœuvre des vannes est voûtée, et son pavement est à la cote (4,00); elle a intérieurement 3m00 de largeur sur 13m80 de longueur et 2m25 de hauteur sous clef. La voûte de 0m50 d'épaisseur qui la recouvre a 0m35 de flèche, et porte sur deux culées, dont l'une, engagée dans les terres de la digue, a 1m20 d'épaisseur, l'autre, formant façade vers l'amont, a 1m30 d'épaisseur, et est élevée à 6m10 en arrière de la façade de l'écluse de ce côté. Cette culée est percée d'une baie de porte de 1m90 de hauteur sur 1m10 de largeur, et de six créneaux, ayant extérieurement 0m10 de largeur sur 0m70 de hauteur, et intérieurement 0m50 de largeur et de hauteur.

Le radier de l'écluse s'étend, de chaque côté, de 6m00 au delà des façades, et est de 0m10 en saillie sur les murs en retour.

Il est continué par des avant-radiers en fascinages, de 17m00 de largeur réduite, sur 15m00 de longueur à l'aval, et 10m00 de longueur à l'amont.

Des fascinages de soutènement, de même longueur à la base, et de 5m00 de longueur au niveau des murs en retour, sont construits

pour maintenir les berges du chenal ; des rysbermes garantissent également les talus du côté des fossés de l'Escaut.

L'ouvrage repose sur une base formée par un plancher et un grillage construits sur pilotis.

La surface supérieure du plancher est à la cote (— 1,00) en amont des portes de flot et à la cote (— 1,30) en aval, excepté dans les deux têtes des avant-radiers et des murs en retour, où elle descend à la cote (— 2,00) en amont, et (— 2,30) en aval sur une largeur de 1m70.

### Détails d'exécution.

Les travaux préliminaires comprenaient la construction, entre l'Escaut et l'emplacement de l'écluse, d'une contre-digue provisoire de 2m50 de largeur en crête, élevée au même niveau que la digue de mer à laquelle elle était rattachée.

Le talus de ce remblai avait 3 de base pour un de hauteur, du côté du fleuve, et 2 de base vers le polder.

Les talus d'eau ont reçu un gazonnement à plat ; leur pied a été assuré par un fascinage et par une file de palplanches en hêtre, ayant 0m10 d'épaisseur et 4m50 de longueur, fixées sur une ventrière de 0m25 et 0m30 d'équarrissage ; celle-ci était assemblée à tenons et mortaises sur 21 pilots de 6m00 de longueur, et maintenue par 11 arcs-boutants, de 6m00 de longueur sur 0m25 et 0m25 d'équarrissage, assemblés sur 11 pilots. Tous ces assemblages ont été fortifiés par des boulons et par des étriers en fer.

Le pilotis se compose de pilots ayant généralement de 7 à 8 mètres de longueur. Les tenons n'ont été taillés qu'après le battage d'une file entière ; ils ont 0m16 de largeur sur 0m08 d'épaisseur. Les mortaises des chapeaux ont 0m08 sur 0m18 en haut ; un coin en chêne sec est chassé dans le tenon pour former queue d'hironde.

Il a été battu deux files de palplanches de 26m50 sous les extrémités des radiers, afin de former encoffrement, ainsi que 67 mètres courants sous les façades, les vannes et les portes de flot. Ces diverses files de palplanches sont en hêtre, ont 0m10 d'épaisseur, 4m50 de longueur, sont assemblées à grain d'orge, affûtées et battues au

moyen d'un mouton de 175 kilog. Elles sont fixées par des clous de $0^m22$ de longueur sur leurs ventrières, à raison de 1 1/2 kilog. par mètre courant de palplanches.

Les pilots des encoffrements n'ont été battus qu'après les palplanches. Les files transversales de pilots sont coiffées de chapeaux de $0^m25$ sur $0^m25$; ceux de ces chapeaux qui servent de ventrières aux palplanches ont $0^m25$ sur $0^m30$, excepté sous les têtes des radiers, où ils ont $0^m30$ sur $0^m30$. Toutes ces pièces dépassent les fondations en maçonnerie d'au moins $0^m30$.

Chacune des files longitudinales de pilots est recroisée d'un cours de longrines de $0^m25$ sur $0^m30$, excepté dans l'axe des passages, où elles n'ont que $0^m20$ sur $0^m20$. Les traversines sont assemblées sur les pilots à tenons et mortaises ; les longrines sont assemblées avec les traversines au moyen d'entailles de $0^m05$ de profondeur, faites dans les deux pièces; cet assemblage est maintenu par un gournable en chêne de $0^m40$ de longueur sur $0^m035$ de diamètre, refendu pour recevoir un coin à chacune de ses extrémités; l'assemblage est en outre consolidé par un boulon barbelé pesant $1^k200$, dans l'axe des passages, sur les rives, suivant trois files en travers aux façades, aux portes de flot et aux vannes.

Les chapeaux de la tête du radier sont ancrés à la plate-forme en arrière au moyen de 11 ancres en fer, de $0^m03$ sur $0^m04$ de section, dont 3 de $4^m$ de longueur développée, 4 de $3^m00$ et 4 autres de $2^m75$.

Les pièces qui forment un même cours de traversines ou de longrines portent au moins sur 6 pilots, et elles sont réunies entre elles au moyen d'assemblages à trait de Jupiter, de $1^m30$ pour les premières et de $0^m60$ pour les secondes, disposés en quinconce. Chaque trait de Jupiter des traversines est consolidé par deux boulons à écrou, de $1^k10$ chacun.

Le ressaut de $0^m30$ que forment les deux parties du plancher est racheté par une lambourde de $0^m20$ sur $0^m30$, fixée de mètre en mètre sur le chapeau inférieur par des boulons à écrou de 2 kilog.

Les longrines s'assemblent à leurs extrémités à queue d'aronde avec recouvrement sur le chapeau inférieur.

Avant la pose du plancher, le fond de la fouille a été soigneusement dévasé et remblayé au moyen d'une couche de terre glaise bien pilon-

née, jusqu'à l'affleurement des traversines, et de manière que ce remblai fût comprimé par le plancher.

Les madriers de la plate-forme ont $0^m10$ d'épaisseur, sont posés à plats joints entre tous les cours des longrines, et en liaison ; chaque madrier est fixé sur chaque traversine par deux chevilles en chêne et par deux clous de $0^m22$ de longueur.

Toutes les ferrures employées dans le grillage ont été noyées dans le goudron avant leur emploi.

Une couche de mousse ou de papier gris a été placée entre le plancher et les traversines, ainsi que sur la tête des palplanches recouvertes par le plancher.

Ce dernier a été terminé par le calfatage et le brayage des joints.

Toute la plate-forme est en hêtre.

Les maçonneries sont en briques, en pierre de taille de Tournay, et en pierre des Écaussines, avec mortier hydraulique.

Les bordures qui terminent le radier de chaque côté, les seuils des coulisses des vannes et des poutrelles de barrage, et ceux des portes busquées sont en pierre des Écaussines; le radier a reçu dans les autres parties un revêtement en pierre de Tournay, de $0^m30$ d'épaisseur moyenne, appareillé comme il est indiqué au plan (fig. 85).

Ce revêtement s'étend sous les piles, et il pénètre de $0^m50$ sous les culées et les murs en aile. Le radier est entaillé de $0^m05$ en aval des portes de flot, et de $0^m025$ au-dessus, pour recevoir la première assise des pierres des piles, culées et murs en aile, qui y sont enracinées.

Les autres parties du radier sont en briques. Leurs bordures extrêmes ont $0^m40$ d'épaisseur sur $0^m60$ de largeur et sont appareillées comme il est indiqué au plan. Ces pierres sont réunies par des agrafes de $1^k00$ chacune.

Les seuils des vannes et des façades ont $11^m10$ de longueur, $1^m00$ de largeur, et $0^m30$ d'épaisseur; les diverses parties sont reliées par deux agrafes de même poids que les précédentes.

Les heurtoirs sous les portes de flot ont $11^m10$ de longueur, $1^m10$ de largeur et $0^m50$ d'épaisseur, taillés pour former les buscs de $0^m40$ de flèche sur $0^m15$ de hauteur.

La pierre *cdgh*, du milieu de chaque heurtoir, a $1^m70$ de longueur à l'aval et $1^m30$ à l'amont; la partie *abcd* (fig. 85) est aussi d'une seule

pièce. Les diverses pierres sont réunies par des agrafes pesant chacune 1k00.

Au-dessus du radier, les avant-becs des piles et des culées, les arcades des têtes de voûtes, et celles des chambres, des portes, les pierres des chardonnets, les coulisses des vannes, les parements des murs de façades, les angles des murs en aile et en retour, ainsi que toutes les tablettes de couronnement sont en pierre bleue des Écaussines; les parements des murs en aile et en retour, ainsi que ceux des piles et culées seront maçonnés en pierre de Tournay; les autres maçonneries sont en briques.

Les avant-becs des piles et des culées ont alternativement 1m40 et 1m60 en parement.

Les pierres d'avant-becs sont retenues de trois en trois assises par des ancres de 0m025 sur 0m03 et de 1m50 de longueur développée.

Chaque chardonnet est formé de trois pierres, comme il est indiqué au dessin.

Chacune des pierres est retenue par deux ancres de 0m03 sur 0m04 et de 2m00 de longueur développée.

L'arrondissement du chardonnet est un arc de cercle de 0m10 de rayon, tangent à la battée du busc du radier, et dont le centre se trouve à 0m10 en dedans du plan de parement des piles et culées; celles-ci sont montées en chaînes à l'emplacement des coulisses des vannes, et ancrées de trois en trois assises.

Une rainure de 0m20 sur 0m20 est entaillée sur toute la hauteur des chaînes; une seconde rainure de 0m15 de largeur sur 0m35 de profondeur descend du sol de la chambre de manœuvre jusqu'à 1m70 au-dessus du radier. Ces coulisses ont, à la partie supérieure, une bordure de 0m30 sur 0m40, dont les diverses pierres sont agrafées entre elles.

Les chaînes d'angle, pour les murs en aile et en retour, sont retenues d'assise en assise par des ancres de 0m02 sur 0m02 et de 1m00 de longueur développée.

Le revêtement en pierre de Tournay des piles, culées, murs en ailes et en retour est relié dans ses diverses parties par 40 agrafes et autant de goujons en fer forgé.

Il a été posé, avec la dernière assise du chardonnet, un chapeau en bois, de 0m30 de hauteur sur 0m40 de largeur, et de 3m40 de lon-

gueur, dont la face inférieure se trouve à la cote (2,80). Ce chapeau présente une battée de 0m10 de hauteur, formant busc comme le seuil du radier; il porte en outre les entailles nécessaires pour le placement des colliers et des portes de flot.

Chaque porte est formée de deux montants, de deux traverses de 0m20 sur 0m25, et de trois traverses de 0m15 sur 0m15, sur lesquels est cloué un revêtement de 0m05 d'épaisseur, portant dans une feuillure de 0m05 sur 0m05 prise dans le cadre extérieur.

Chaque vantail est porté par une crapaudine femelle en bronze, fixée dans le poteau-tourillon et portant sur une crapaudine mâle scellée dans le radier.

Le poteau-tourillon, convenablement délardé (fig. 58), porte à sa partie supérieure un collier en bronze, qui est maintenu par un collier en fer, de 0m177 de diamètre et 0m08 de hauteur, formé de deux parties, dont l'une est dormante et scellée par deux branches dans la pierre du chardonnet; l'une de ces branches, garnie d'un œillet, est traversée par le crochet de l'ancre qui fixe le chardonnet à la maçonnerie.

Dans chacune des coulisses situées sous la chambre, il peut être placé deux vannes en bois de chêne.

La vanne inférieure, de 2m86 de largeur sur 1m80 de hauteur, est formée d'un cadre de 0m18 sur 0m20 et d'une traverse supplémentaire de même équarrissage. Un double revêtement, en madriers recroisés de 0m05 d'épaisseur, pénètre dans une rainure, de 0m05 sur 0m05, pratiquée dans le cadre.

La vanne supérieure, de 3m16 de largeur sur 1m45 de hauteur, est formée d'un cadre de 0m15 sur 0m20, et d'un montant intermédiaire de même équarrissage, avec double revêtement en madriers de 0m04, s'engageant de même dans une rainure de 0m05 sur 0m05.

Les montants des deux vannes portent chacun deux roulettes en fer avec coussinets en cuivre.

La manœuvre de chaque vanne se fait au moyen de chaînes s'enroulant sur l'arbre d'un treuil manœuvré par une roue à chevilles.

Il a en outre été placé, dans la voûte de la chambre de manœuvre, les ferrures nécessaires à l'attache de quatre poulies, pour descendre les vannes dans les coulisses ou les en retirer complétement.

Pour la construction des avant-radiers, il a été placé d'abord, sur le terrain naturel, un grillage formé de saucissons de $0^m10$ de diamètre, se recroisant de mètre en mètre. Chaque croisement est maintenu par un piquet à clef de $1^m00$ de longueur; le premier cours de saucissons est placé dans des rigoles creusées au fond de la fouille.

Les intervalles de ce grillage ayant été arasés par une couche de glaise bien pilonnée, on a étendu ensuite dans le sens du courant une couche de roseaux de $0^m10$ d'épaisseur, et en travers de ceux-ci un lit de fascines de $0^m20$ d'épaisseur; sur ce dernier on a établi un lit semblable, dans une direction normale à la précédente; et le tout a été maintenu par des tunages de $0^m25$ à $0^m30$ de hauteur, placés en travers du courant, et à $0^m60$ de distance. Les piquets de ces tunages ont $2^m00$ de longueur et sont espacés de $0^m40$.

L'intervalle entre les tunages a été arasé de décombres sur $0^m10$ de hauteur, puis d'une assise de moellons de Tournay, affleurant les têtes des piquets, les moellons étant convenablement serrés au moyen de recoupes.

Du côté de l'Escaut, l'avant-radier s'appuie contre une file de palplanches de $0^m10$ d'épaisseur, $4^m50$ de longueur, et $17^m00$ de développement, qui est fixée sur une ventrière de $0^m25$ sur $0^m30$ portée par 8 pilots de $6^m00$ de longueur.

De chaque côté de l'écluse, et sur chaque berge du chenal d'écoulement, il a été construit des fascinages de soutènement, de la manière suivante :

Après avoir arasé et damé le terrain au niveau de l'avant-radier, on l'a recouvert d'un premier lit de fascines, formé de couches se recouvrant barbe à barbe et fixées par trois cours de tunages.

Les tunes de devant ont été arasées avec des décombres, et les autres, ainsi que les parties postérieures des lits de fascines, ont été rechargées de fortes terres bien pilonnées. Le deuxième lit est formé de fascines, le gros bout tourné en dehors, fixées et remblayées comme le premier. Chaque lit a $0^m35$ d'épaisseur totale, dont 2/3 en fascinage et 1/3 en décombres et terre glaise.

Tous les lits sont confectionnés de la même manière, excepté le couronnement qui est formé de deux couches de fascines recroisées,

maintenues par six cours de forts tunages, dont les intervalles de 0m50 ont été rechargés de décombres et de moellons, comme les avant-radiers.

### Discussion critique.

La nouvelle citadelle construite au Nord d'Anvers n'est séparée de l'Escaut que par son fossé capital et par la digue du fleuve (fig. 86).

Cet ouvrage est précédé d'un chemin-couvert et d'un avant-fossé dont le bassin est limité, du côté du polder d'*Austruweel*, par une digue de contrescarpe.

Un batardeau éclusé A, dont les deux pertuis ont chacun 4m35 en section, sépare le chemin couvert de la citadelle de celui de l'enceinte, et permet d'établir une communication entre le fossé capital et l'avant-fossé. Ce dernier ne communique avec le polder que par le lit du ruisseau dit *Vossche-Schyn*, qui y pénètre par une coupure pratiquée dans la digue de contrescarpe au Nord de l'ouvrage et munie d'un barrage à poutrelles B, afin de pouvoir évacuer les eaux de ce ruisseau, par les fossés, dans les temps ordinaires comme à l'époque des crues.

Le niveau du Vossche-Schyn, vers son entrée, atteint respectivement les cotes moyennes 0,90 et 1,40 en été et en hiver, sauf après de grandes pluies ou à la fonte des neiges, par suite des nombreux affluents qu'il reçoit de la Campine; on peut donc estimer que, dans les circonstances ordinaires, le niveau des eaux de l'avant-fossé variera entre ces limites. Du reste, ce niveau sera réglé, en temps de paix, par les agents de l'administration du polder, à qui l'on remettra le soin de manœuvrer l'écluse d'aval de la citadelle.

Le fond du fossé capital est à la cote (—2,50), et celui de l'avant-fossé à la cote (—1,50), le plan de repère coté (0,00) étant celui de la marée basse d'Ostende. A chacun de ces fossés correspond une écluse maritime, l'une d'amont *m*, au droit du fossé de gorge, l'autre *n*, en aval du fleuve et en face de l'avant-fossé.

Ces écluses doivent, en temps de guerre, donner le moyen de tendre des inondations défensives, et procurer des manœuvres d'eau dans les fossés de l'ouvrage; en temps de paix, elles doivent servir à l'évacua-

tion du trop plein des eaux du Vossche-Schyn, des polders supérieurs et des fossés de la place et de la citadelle du Nord.

On avait d'abord proposé de ne construire qu'une écluse, celle d'amont, et d'établir sur l'avant-fossé un batardeau éclusé, afin d'interdire tout passage à l'ennemi de ce côté par la digue de mer; ce batardeau devait servir à tendre l'inondation simultanément avec l'écluse du fossé capital.

Ce premier projet fut abandonné, avec raison, pour les motifs suivants :

1° L'ouvrage hydraulique en regard de l'avant-fossé doit, non-seulement alimenter ce fossé ou en modifier le niveau, mais encore servir à tendre l'inondation des polders le plus rapidement possible. S'il n'y avait que le premier but à atteindre, un batardeau éclusé suffirait; mais, dans le cas actuel, il faut pouvoir disposer d'une section d'écoulement d'autant plus considérable que la charge d'eau suit l'intermittence des marées. On pourrait peut-être objecter qu'on multiplierait le nombre de pertuis dans le batardeau; mais la sûreté exige que l'on ait à sa disposition un double système de retenues, c'est-à-dire des vannes et des portes busquées; dès lors l'épaisseur à donner à l'ouvrage devient considérable.

Il ne faut pas songer à se dispenser d'employer des portes de flot vu la grande hauteur d'eau que les vannes auraient à soutenir à chaque marée montante, et le batardeau devant aussi servir à l'évacuation du trop-plein des fossés et des polders supérieurs.

2° Il serait très-difficile de ménager dans un batardeau éclusé des chambres supérieures voûtées à l'épreuve, pour la manœuvre des vannes, ainsi que des passages couverts pour y arriver. Comme ces locaux ne pourraient dépasser les épaules du batardeau, cette faible hauteur serait défavorable à l'objet principal de la construction; il faudrait, en effet, prendre en longueur ce qu'on ne peut avoir en hauteur, ce qui tendrait à affaiblir d'autant la résistance de l'ouvrage.

3° Un batardeau éclusé à l'Escaut offre non-seulement de grandes difficultés d'établissement, mais encore présente peu de garanties de stabilité, lorsqu'on veut rester dans de justes limites. Lors de la manœuvre des vannes, sous de fortes charges, il se produit des mouvements de trépidation tels, que toute la construction finit par être

disloquée. Ainsi, les batardeaux éclusés situés en amont et en aval des forts *Lillo* et *Liefkenshoek* furent emportés quand les Hollandais tendirent l'inondation en 1831.

4° Comme une seconde écluse n'offre pas contre les tentatives de l'ennemi un obstacle suffisant, rien n'empêche de la prolonger par un batardeau plein, ou d'établir celui-ci à 80 ou 100 mètres en aval. Cependant, il n'est pas probable qu'un assaillant serait assez hardi pour tenter une attaque brusque sur la place en défilant sur une digue bien battue et ayant d'un côté le fleuve, de l'autre une inondation non guéable. Il y aura tout au plus à craindre un coup de main sur les écluses, pour saigner l'inondation.

Par suite des considérations précédentes, la construction des deux écluses fut décidée, chacune d'elles devant présenter trois pertuis accolés, de 7m50 de largeur totale, sur 2m80 de hauteur sous clef prise au-dessus du radier d'amont établi à la cote (0,00) de la marée basse d'Ostende.

Divers accidents arrivés par l'interposition de corps étrangers, dans des écluses à une seule paire de portes busquées, entre autres à celles du *Kattendyk*, de la *Tête de Flandre*, de *Saint-Paul* en aval du fort Sainte-Marie, etc., ont démontré la nécessité de munir les écluses des polders de deux paires de portes de flot.

Cette précaution a été adoptée à la citadelle du Nord. Il faut remarquer cependant, à ce sujet, que les écluses d'asséchement des polders, ne devant pas retenir les eaux intérieures à marée basse, ne sont pas munies de vannes comme les écluses militaires, dans lesquelles celles-ci constituent la partie principale et indispensable. Aussi, dans ces derniers ouvrages, l'utilité d'une double paire de portes est bien moins évidente que dans les écluses paysannes. Une seule paire aurait donc pu suffire si l'on avait adopté un batardeau éclusé.

Ainsi que nous l'avons vu, le niveau de l'avant-fossé ne doit pas dépasser une certaine limite, en temps ordinaire, afin d'éviter des inondations désastreuses dans les régions hautes du Vossche-Schyn. Pour éviter le danger qui pourrait résulter de la négligence d'un éclusier, tout en conservant une certaine hauteur d'eau dans les fossés, on a adopté un système de vannes superposées, la vanne inférieure s'élevant, pour l'écluse d'aval, jusqu'au niveau que l'on peut tenir dans

l'avant-fossé, et pour celle d'amont, jusqu'à la hauteur d'eau que l'on veut conserver dans le fossé capital en temps de paix. C'est donc à tort que l'on a prescrit au contrat d'entreprise une même hauteur de 1m80 pour les vannes inférieures; il eût été préférable de leur donner à toutes deux une hauteur totale de 1m55, soit 1m40 au-dessus du radier, ce qui est la limite supérieure du niveau de l'avant-fossé; l'on aurait conservé en même temps, de cette façon, 3m90 d'eau dans le fossé capital, ce qui est plus que suffisant.

La vanne supérieure étant destinée à tendre l'inondation, il suffisait de lui donner la hauteur nécessaire pour que le passage pût être complétement fermé, c'est-à-dire 1m60 en supposant les recouvrements de 0m10.

En adoptant ces dimensions, l'on eût diminué notablement le poids des vannes inférieures, sans augmenter dans le même rapport celui des autres, dont les équarrissages sont plus faibles.

Cette division des vannes en deux parties était ici de toute nécessité, car l'on eût éprouvé de sérieuses difficultés à faire mouvoir régulièrement dans leurs coulisses des vannes d'environ 3m00 de hauteur et de largeur, solidement construites à cause des fortes pressions d'eau, et armées de ferrures qui ajoutent beaucoup à leur poids.

Quand l'inondation doit être tendue, chaque porte busquée est maintenue dans son enclave par deux fléaux en fer qu'on place à marée basse. Ces fléaux sont terminés à l'une des extrémités par un crochet horizontal qui s'engage dans l'œil d'un piton vertical ancré dans le bajoyer en aval de l'enclave; vers l'autre extrémité, ils sont percés d'une mortaise, dans laquelle passe la tête d'un piton horizontal ancré en amont du poteau-tourillon. Une clavette chassée dans l'œil rectangulaire du deuxième piton arrête le fléau.

Pendant cette période, les vannes sont levées à marée montante et baissées au reflux aux moments où le niveau s'établit en amont et en aval des passages.

Pour inonder les polders, il faut remplir l'avant-fossé jusqu'à ce que ses eaux, refoulées dans le Vossche-Schyn, débordent les rives de ce ruisseau et se répandent sur les terrains bas. Le barrage à poutrelles ménagé dans la digue de contrescarpe reste ouvert aussi longtemps que le niveau de l'avant-fossé est plus élevé que celui de l'inon-

dation, à moins que celle-ci n'ait atteint les limites qu'on veut lui assigner et qui peuvent s'élever jusqu'à la cote (4,00), niveau du pavement de la chambre des vannes.

Les épaisseurs données aux culées, à leurs contre-forts, et au radier des passages, sont supérieures à celles qui étaient nécessaires pour des écluses de l'espèce, n'ayant que 2m50 d'ouverture, une faible hauteur, garanties par un plancher, et trouvant un surcroît de stabilité dans les voûtes mêmes et les remblais qui les recouvrent.

D'un autre côté, la voûte adoptée pour la chambre des vannes présente une résistance insuffisante aux effets d'une bombe ordinaire. Il eût été préférable de recouvrir cette galerie d'une voûte en plein cintre de 0m80 d'épaisseur, et d'augmenter de 0m20 à 0m25 la largeur et la hauteur sous clef. Il suffisait, pour ce nouveau profit, de relever la crête de la digue d'environ 0m80 au lieu de 0m30, sur 13 à 14 mètres de longueur, à chaque écluse. L'épaisseur du piédroit d'amont, qui est exposé à l'action des projectiles de toute espèce, aurait été portée, dans ce cas à 1m80, sauf à le protéger encore par un blindage incliné à l'époque du siége.

Comme la pression supportée par les vannes vient de l'amont, c'est-à-dire du polder, quand l'inondation est tendue, il était naturel de placer la coulisse de la vanne supérieure en aval de l'autre (fig. 87), afin d'empêcher l'eau de profiter du jeu laissé dans les rainures, et de se déverser par-dessus la vanne supérieure, comme cela ne manquera pas d'arriver avec la disposition adoptée (fig. 85), lorsqu'on voudra obtenir une inondation dont le niveau dépasse la cote 2,95.

Les observations qui précèdent sont de peu d'importance, et ne s'appliquent guère qu'à la construction proprement dite des écluses. Mais, considérés au point de vue exclusivement militaire, ces ouvrages ont un défaut réel, qui consiste dans l'absence d'une communication sûre avec la citadelle, dont ils sont une dépendance. Il y aura certes toujours moyen de tendre une inondation défensive au début des opérations; mais il serait fort chanceux de compter sur des manœuvres d'eau puissantes et bien coordonnées, pendant un siége en règle, si l'on ne prend des mesures convenables pour parer à l'inconvénient que nous venons de signaler.

## ÉCLUSE DE CHASSE ET DE NAVIGATION D'OSTENDE.

L'écluse militaire d'Ostende, construite en 1821, possède trois passages, dont deux de 6m00 et un de 12m00 de largeur (fig. 88). Chacun des deux premiers est fermé par une porte de flot et une porte tournante. Le troisième est disposé pour la navigation en même temps que pour les chasses; il est muni, à cet effet, d'une paire de portes de flot et d'une paire de portes d'ebbe, ces dernières possédant chacune une porte tournante enchâssée.

La porte de flot (fig. 69) est formée d'un bâti en charpente avec bordage de 0m05 d'épaisseur en amont. Elle a 8m20 de hauteur sur 7m10 de largeur.

Le bâti se compose d'un poteau-tourillon de 0m55 sur 0m60 d'équarrissage; d'un poteau-butant de 0m50 sur 0m45; de sept entretoises de 0m45 de largeur sur 0m50 d'épaisseur moyenne, et de deux bracons, de 0m35 sur 0m25, d'une seule pièce. Ceux-ci sont assemblés par entailles de 0m08 avec les entretoises. Le tout est consolidé par des ferrures, ainsi qu'il est indiqué au dessin, et par deux corbeaux de 2m10 de longueur, placés entre les deux traverses supérieures, et encastrés dans le poteau-tourillon.

Les portes d'ebbe (fig. 70) sont analogues aux précédentes, sauf dans le panneau inférieur qui correspond à la porte enchâssée.

Elles ont même largeur que les portes de flot, mais seulement 6m85 de hauteur. L'équarrissage du poteau-tourillon est de 0m55 sur 0m60; celui du poteau-butant et des quatre traverses est de 0m50 sur 0m50. Le bordage, placé en amont, a 0m05 d'épaisseur. Les bracons et corbeaux ont le même équarrissage que dans les portes de flot. Le système est consolidé par des équerres, des étriers et un tirant oblique, en fer, fixé à la tête du poteau-tourillon.

Les portes tournantes n'ont point de bordage. Chacune d'elles a 5m65 de largeur, et se compose de 23 montants verticaux, y compris le poteau-tourillon et les deux poteaux-butants. Ces trois derniers sont en chêne et les vingt autres en sapin du Nord.

Les montants ont de 0m12 à 0m20 d'épaisseur sur 3m32 de hauteur, s'assemblent à rainures et languettes, et sont reliés entre eux par des

ferrures. Ils sont solidement maintenus en haut et en bas par deux fortes moises, de 0m25 sur 0m30 d'équarrissage, rapprochées par 22 boulons et assemblées par redans ou crémaillères avec les montants.

Le poteau-tourillon divise la porte tournante en deux ailes, qui ont 3m35 et 2m30 de largeur. Il tourne dans les deux entretoises inférieures de la porte d'ebbe. Son équarrissage est de 0m55 sur 0m45 d'épaisseur.

Les portes tournantes (fig 71) qui ferment les deux passages de 6m00 sont construites sur les mêmes principes que les vantaux enchâssés que nous venons de décrire.

Leur longueur totale est de 5m85, les deux ailes ayant respectivement 3m60 et 2m25. Les montants intermédiaires sont encore en sapin, mais leur équarrissage varie de 0m25 à 0m45, et leur hauteur est de 6m95.

Le poteau-tourillon, qui est en chêne, a 0m35 sur 0m45; il tourne en bas dans une crapaudine scellée au radier et en haut dans la charpente du pont de service.

Les poteaux tournants demi-cylindriques, logés dans les enclaves de la maçonnerie des culées et de la pile, dépassent le plancher supérieur, et sont percés à leur tête d'ouvertures destinées à recevoir des leviers de manœuvre.

Le débouché total de l'écluse militaire comprend :

| | | |
|---|---|---|
| 2 passages de 6m00. . . . . | 12m00 | |
| à déduire les épaisseurs des portes. . | 0m80 | |
| Reste. . . . | | 11m20 |
| 2 vantaux de chasse, de 5m65. . . | 11m30 | |
| à déduire les épaisseurs des poteaux-tourillons . . . . . | 0m90 | |
| Reste. . . . | | 10m40 |
| Débouché total. . . . | | 21m60 |

La capacité de l'arrière-port, formant bassin de retenue, est de 320,000m³ environ, à haute mer de vives eaux ordinaires; il se vide en 35 minutes; la hauteur de chute varie de 3m10 à 4m00, selon l'amplitude des marées.

On remarque que les vantaux enchâssés se placent à peu près normalement aux portes d'ebbe, et que les portes tournantes ne se placent pas non plus dans le sens du passage ; celles-ci affectent une position analogue à celle qui est indiquée au dessin (fig. 88).

Un mécanisme à échappement permet d'ouvrir simultanément les deux portes tournantes et les deux vantaux enchâssés.

## ÉCLUSE A PORTES EN ÉVENTAIL DE NIEUPORT.

Construite en 1823 pour la défense de Nieuport, par le capitaine-ingénieur *Goblet*, cette écluse permet de faire varier le niveau de l'eau dans les fossés de la forteresse, et d'y exécuter des chasses pour détruire les travaux de l'ennemi.

En temps ordinaire, elle sert à la navigation ; les portes d'ebbe *b* et de flot *a* (fig. 89) n'ont pas d'autre but ; elles déterminent le sas avec les portes en éventail. Ainsi, lorsqu'on veut introduire un bateau dans ce dernier, on ouvre d'abord les vantelles ménagées dans la porte de flot, et l'eau se met ainsi au même niveau dans le sas qu'en amont de l'écluse. L'on ouvre entièrement les portes busquées *a* et *b*, et l'on fait entrer le bateau dans le sas Lorsqu'on veut le faire passer ensuite dans le bief d'aval, on ferme les vantelles, et on agit sur les portes en éventail comme si l'on voulait donner une chasse ; par suite, l'eau descend dans le sas au niveau d'aval, et les portes en éventail étant ouvertes, rien ne s'oppose à ce qu'on fasse passer le bateau dans le bief inférieur. La manœuvre est inverse pour remonter dans le bassin d'amont.

La porte d'ebbe *b* a pour objet de permettre les manœuvres de navigation, quand les eaux se trouvent, par suite du reflux, à un niveau plus élevé dans le bassin d'aval que dans celui d'amont.

L'écluse est construite sur un pilotis recouvert d'un grillage avec plancher (fig. 89, coupe *cd*). Les pilots ont $0^m30$ d'épaisseur et sont espacés de $1^m00$ d'axe en axe. Sept files de palplanches défendent le radier contre les filtrations.

La largeur du passage est de $5^m00$.

Les bajoyers ont $5^m55$ de hauteur au-dessus de la plate-forme du pilotis, et $5^m20$ au-dessus du radier. Leur épaisseur en haut est

de 2m00; elle atteint 2m80 à une hauteur de 1m80 au-dessus de la plate-forme, et cette différence est rachetée par neuf retraites. Ils sont consolidés par des contre-forts, espacés de 6m00 d'axe en axe, et ayant 1m00 de largeur sur 1m20 de queue.

Au droit des portes busquées, l'épaisseur des bajoyers est augmentée de 2m00 sur 6m00 de longueur. Les colliers des poteaux-tourillons sont fixés dans la maçonnerie, ainsi qu'il est indiqué au plan.

Les aqueducs latéraux ont 0m80 de largeur sur 1m20 de hauteur sous clef; leur voûte est en plein cintre.

La maçonnerie est en briques; on y remarque seulement quelques chaînes en pierre de taille à l'emplacement des portes et aux coulisses pour barrages. Les musoirs sont également en pierre.

Les radiers du passage et des aqueducs sont établis au même niveau, et formés d'un plancher sur traversines espacées entre elles de 0m50.

L'avant-radier repose sur un grillage avec pilotis, et se compose d'une aire en maçonnerie de briques, de 0m60 d'épaisseur, recouverte d'un grillage en charpente avec plancher, qui se trouve dans le prolongement du radier de l'écluse. Les cases de ce grillage sont remplies avec de la maçonnerie.

Le faux radier est en fascinages. Il est formé d'un lit de fascines posées à plat, recouvert par un tunage lesté de pierres, le tout ayant une épaisseur de 1m40.

L'éventail est formé :

1° d'une porte proprement dite, ou petit vantail, ayant 4m70 de hauteur sur 3m10 de largeur;

2° d'un grand vantail, de même hauteur que le précédent, mais d'une largeur de 3m70;

3° de cinq étrésillons, de 0m15 sur 0m20, assemblés sur les entretoises des deux vantaux;

4° de trois traverses horizontales, de 0m10 sur 0m18 à 0m22 d'équarrissage, soutenant ces derniers vers le milieu, et engagées d'un côté dans le poteau-tourillon;

5° d'un montant extérieur, de 0m10 sur 0m15, soutenant l'autre extrémité des traverses;

6° d'un bracon de décharge, de 0m10 sur 0m20, portant par le pied

dans le chanfrein du poteau-tourillon, et soutenant par le haut le montant extérieur.

La porte proprement dite (fig. 90) est formée d'un bâti en charpente avec double bordage de $0^m05$ d'épaisseur.

Le bâti se compose :

1° d'un poteau-tourillon de $5^m20$ de hauteur, sur $0^m55$ et $0^m55$ d'équarrissage avant son délardement ;

2° d'un poteau busqué, de $4^m85$ de hauteur sur $0^m32$ et $0^m36$ ;

3° de cinq entretoises, de $0^m30$ à $0^m35$ de largeur sur $0^m20$ à $0^m25$ d'épaisseur ;

4° d'un grand bracon de $0^m25$ sur $0^m30$ ;

5° d'un petit montant intermédiaire, ayant $0^m25$ sur $0^m30$ d'équarrissage.

Le grand vantail, dont le bâti est analogue au précédent, mais sans montant intermédiaire, possède aussi un double bordage de $0^m05$ d'épaisseur.

Ces différentes pièces sont reliées entre elles par des équerres et autres ferrures, ainsi qu'il est indiqué au dessin.

On a remarqué à l'écluse de Nieuport, que les portes en éventail, précédées de longs passages, sont d'une manœuvre plus facile que lorsqu'elles se trouvent au débouché d'un pertuis très-court.

On peut se rendre compte de cette différence, en remarquant que le rétrécissement de la veine fluide, qui s'effectue à une grande distance des portes, fait que le niveau de l'eau baisse rapidement dans le passage, dès que celles-ci commencent à s'ouvrir, et qu'ainsi, la manœuvre s'opère sous des pressions beaucoup moindres que si les portes se trouvaient rapprochées de la chute.

FIN.

# TABLE DES MATIÈRES.


Pag.

## CHAPITRE PREMIER.

### PRÉLIMINAIRES.

*Descriptions générales* . . . . . 5
Syzygies et quadratures . . . . . *ib.*
Marées . . . . . *ib.*
Établissement du port. . . . . 7
Heures des marées . . . . . 8
Unité de marée . . . . . 9
Coefficient de marée . . . . . *ib.*
Durée et hauteur des marées . . . *ib.*
Chenal . . . . . *ib.*
Rade. . . . . 10
Avant-port . . . . . *ib.*
Port . . . . . *ib.*
Bassin à flot . . . . . 11
*Applications militaires* . . . . . 12
Port et bassins de Cherbourg . . . *ib.*

## CHAPITRE DEUXIÈME.

### VAGUES ET RESSACS ; ÉVALUATION DE LEUR PUISSANCE.

*Vagues*. . . . . 14
*Ressacs* . . . . . 15
Ressac vertical. . . . . 16
Ressac par réflexion . . . . . *ib.*
Ressac par transmission . . . . . 17
Clapotage . . . . . *ib.*
*Calcul de la puissance des vagues*. . . 18

## CHAPITRE TROISIÈME.

### ACTION DE L'EAU DE MER SUR LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.

*Matériaux divers* . . . . . 21
Bois . . . . . *ib.*
Fer . . . . . 22
Fer zingué. . . . . *ib.*
Fonte . . . . . *ib.*
Cuivre, bronze . . . . . *ib.*
Mortiers et bétons . . . . . 23
Pierres . . . . . 27

## CHAPITRE QUATRIÈME.

### CONSERVATION DES BOIS NOYÉS.

*Méthodes diverses* . . . . . 29
Préliminaires. . . . . *ib.*
Injection des bois . . . . . *ib.*
Injection par immersion . . . . . 30
Injection par filtration avec pression. 31
Injection par le vide et la pression . 33

Pag.

Créosotage des bois ; systèmes de J. Bethell . . . . . 36
Mailletage . . . . . 40
Doublage en cuivre et en zinc . . . *ib.*
Enduits et ciments . . . . . 41

## CHAPITRE CINQUIÈME.

### MATÉRIAUX POUR FASCINAGES.

*Bois* . . . . . 42
Fascines . . . . . *ib.*
Saucissons. . . . . 43
Piquets. . . . . 44
Harts . . . . . *ib.*
Clayons. . . . . *ib.*
Gaules . . . . . 45
*Matériaux divers* . . . . . *ib.*
Roseaux . . . . . *ib.*
Pierres . . . . . *ib.*
Paille . . . . . *ib.*
Terre glaise ou de schorre . . . . 46

## CHAPITRE SIXIÈME.

### REVÊTEMENTS DES TALUS.

*Revêtements en paillassonnages* . . . 47
*Revêtements en fascinages* . . . . . 48
Tunage. . . . . *ib.*
Revêtement ordinaire . . . . . 49
Revêtement à tunes serrées . . . . 50
Revêtement à tunes lesté. . . . . *ib.*
Rysberme . . . . . 54
Fascinage en barbe. . . . . 51
*Fascinages de soutènement* . . . . . 55
Pakwerk . . . . . *ib.*
Pakberme . . . . . 56
*Applications militaires* . . . . . 57
*Avantages et inconvénients des fascinages*. . . . . 58
*Revêtements en pierres sèches* . . . . 59
Perrés en mœllons . . . . . *ib.*
Perrés en briques . . . . . 61
Perrés mixtes. . . . . *ib.*

## CHAPITRE SEPTIÈME.

### MURS DE REVÊTEMENT.

*Calcul et discussion de l'épaisseur* . . 64
*Discussion du profil* . . . . . 86
*Môles, jetées, brise-lames et musoirs*. —
*Définitions* . . . . . 90
*Brise-lames en fascinages* . . . . . *ib.*
Brise-lames en terre glaise revêtue . 91
Brise-lames en fascinages et décombres 92

Pag.

Brise-lames en fascinages. . . . . 92
Brise-lames en fascinages et terre de schorre . . . . . 93
Brise-lames en matériaux divers . . ib.
*Môles en enrochements* . . . . . 94
A pierres perdues naturelles. . . . ib.
En blocs de béton . . . . . 95
Par encoffrement ou encaissement. . 96
*Jetées et musoirs en charpente* . . . . 104
*Jetées et môles en maçonnerie* . . . . 110
*Application militaire* . . . . . 114
Digue de Cherbourg . . . . . ib.

## CHAPITRE NEUVIÈME.

### FONDATIONS DES OUVRAGES HYDRAULIQUES.

*Considérations générales* . . . . . 123
*Enrochements et bétonnages* . . . . 124
*Fondations sur pilotis* . . . . . 125
Définitions . . . . . ib.
Sondage du terrain. . . . . 126
Pilots d'épreuve. . . . . 127
Longueur des pilots . . . . . 129
Section des pilots . . . . . 130
Préparation . . . . . 131
Battage. . . . . ib.
Sonnettes à tirandes . . . . . 132
Sonnettes à déclic . . . . . 133
Battage à la vapeur. . . . . 134
Pilots à vis . . . . . 135
Détails d'exécution. . . . . ib.
Grillages . . . . . 136
Plancher . . . . . 137
Palplanches . . . . . 138
*Application militaire* . . . . . 139
Pilotis d'écluse d'inondation . . . ib.
*Fondations tubulaires* . . . . . 143
Pilots en béton . . . . . ib.
Colonnes encaissées . . . . . 144
Fondations tubulaires à l'aide du vide. 145
Fondations tubulaires par l'air comprimé . . . . . ib.
*Fondations par caissons foncés* . . . 147
*Fondations par encaissements* . . . . 149
*Appareils sous-marins* . . . . . 151
Cloche à plongeur . . . . . ib.
Bateau-plongeur . . . . . 152
Hydrostat sous-marin. . . . . 153
Scaphandres . . . . . 154
Encaissement à revêtir . . . . . 155

## CHAPITRE DIXIÈME.

### AQUEDUCS ET SIPHONS.

*Aqueducs*. . . . . 158
Description raisonnée . . . . . ib.
Voûtes à l'épreuve . . . . . 166
*Applications militaires* . . . . . 168
Aqueducs des forts Sainte-Marie et Liefkenshoek (bas-Escaut) . . . ib.
Description générale . . . . . ib.
Description détaillée . . . . . 170
*Aqueducs siphons* . . . . . 175
En maçonnerie . . . . . ib.
En fonte . . . . . ib.
*Application militaire*. . . . . 181
Siphon du fort Sainte-Marie. . . . ib.
Description raisonnée. . . . . ib.
Manœuvre du siphon . . . . . 186
Calcul de la dépense d'eau. . . . . ib.

## CHAPITRE ONZIÈME.

### ÉCLUSES MARITIMES ORDINAIRES.

*Description générale* . . . . . 191
*Description raisonnée*. . . . . 192
Fondations . . . . . ib.
Bajoyers . . . . . 196
Radier . . . . . 199
Avant-radiers, faux-radiers; garde-radiers . . . . . 204
Buses . . . . . ib.
Chardonnets . . . . . 206
Aqueducs . . . . . ib.
Portes busquées. . . . . 207
Portes courbes . . . . . 221
Portes mixtes ou métalliques . . . 222
Portes superposées. . . . . 223
Manœuvre des portes . . . . . ib.

## CHAPITRE DOUZIÈME.

### ÉCLUSES DE CHASSE.

*Description générale* . . . . . 225
*Vannes à coulisses*. . . . . 226
*Portes tournantes simples* . . . . . 227
Portes simples sans vantelle. . . . 228
Portes simples avec vantelle. . . . 229
*Portes tournantes couplées* . . . . . 230
*Portes busquées avec vantail de chasse*. 232
*Portes en éventail* . . . . . 234
*Des chasses* . . . . . 241

## CHAPITRE TREIZIÈME.

### ÉCLUSES MILITAIRES.

*But et conditions* . . . . . 244
*Écluses de la citadelle-nord d'Anvers* . 245
Description générale . . . . . ib.
Détails d'exécution. . . . . 247
Discussion critique. . . . . 253
*Écluse de chasse et de navigation d'Ostende*. . . . . 258
*Écluse à portes en éventail de Nieuport*. 260

# ERRATUM.

**Page 81.** *Au lieu de* $\left[f'' P \sin.(\varphi' \pm \varepsilon) + Q + Q'\right]$ *lisez* $f''\left[P \sin.(\varphi' \pm \varepsilon) + Q + Q'\right]$

This book should be returned to the Library on or before the last date stamped below.

A fine of five cents a day is incurred by retaining it beyond the specified time.

Please return promptly.

3 2044 079 963 997